



**André Policarpo
Lourenço**

**Resistência ao fogo de pilares com secções em I de
Classe 4 em aço inoxidável**



**André Policarpo
Lourenço**

**Resistência ao fogo de pilares com secções em I de
Classe 4 em aço inoxidável**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Nuno Filipe Ferreira Soares Borges Lopes, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co-orientação científica do Professor Doutor Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

o júri

Presidente

Prof. Doutora Ana Luísa Pinheiro Velosa
Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro

Doutor Carlos André Soares Couto
Consultor, Lindab S.A. (arguente)

Prof. Doutor Nuno Filipe Ferreira Soares Borges Lopes
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador)

Agradecimentos

A todas pessoas que de alguma maneira me ajudaram a completar uma etapa tão importante como esta, sozinho não o teria conseguido.

Ao meu orientador, Prof. Nuno Lopes, por compartilhar e disponibilizar todo o seu conhecimento, pela paciência, incansável disponibilidade de ajudar e pelo incentivo e otimismo transmitido.

Ao meu coorientador Prof. Vila Real pela disponibilidade manifestada, sugestões pertinentes e sabedoria transmitida.

A todos os meus amigos, pelas horas de descontração, paciência e apoio nesta etapa que agora chega ao fim, em especial ao Alexandre Peralta, Daniela Rodrigues, Ricardo Dias e Alan Svec.

À minha namorada Daniela Sousa por todo o seu incondicional apoio, força transmitida e acreditar em mim.

Por último à minha família, aos meus irmãos João Daniel e David e aos meus pais Maria e João por todo o esforço feito para eu atingir este objetivo e por me apoiarem em todas as situações, em especial nos maus momentos.

palavras-chave

Aço inoxidável, Secções de Classe 4, Pilares, Incêndio, Encurvadura, Eurocódigo 3.

resumo

A presente dissertação tem como principal objetivo aumentar o conhecimento do comportamento estrutural de elementos axialmente comprimidos de secção esbelta (classe 4) de aço inoxidável na construção.

Apesar do seu preço superior quando comparado ao aço de carbono, tem-se verificado um aumento da aplicação de elementos estruturais em aço inoxidável com secções de classe 4, tornando-se fundamental perceber e compreender o seu comportamento.

As estruturas de secção mais esbeltas são caracterizadas pela grande propensão para fenómenos de encurvadura local, mas também para encurvadura global. Estes fenómenos de instabilidade intensificam-se quando as secções são sujeitos a altas temperaturas, como em situação de incêndio.

Este trabalho apresenta um estudo numérico, com o auxílio do programa de elementos finitos SAFIR, sobre o comportamento ao fogo com perfis em I de aço inoxidável de Classe 4, quando submetidos a compressão axial.

São comparados os resultados numéricos com a metodologia de dimensionamento proposto pelo Eurocódigo 3 bem como outras duas propostas de dimensionamento, é avaliada a influência de vários parâmetros, como o tipo de aço e o tipo de secção transversal. Por fim é realizada uma avaliação estatística dos resultados numéricos.

keywords

Stainless steel, Class 4 sections, Columns, Fire, Buckling, Eurocode 3.

Abstract

The main focus of the present thesis is to increase the knowledge of the structural behavior of stainless steel elements in construction .

Despite of its higher price when compared with carbon steel, the use of structural elements in stainless steel with class 4 sections has increased, and is now crucial to understand his behavior.

Structures containing slender sections are characterized by a significant probability to develop local buckling, as well as global buckling. These instability phenomenon are intensified when the sections are subject to higher temperatures, like in a fire.

This work presents a numerical study, with the support of the program SAFIR, about the behavior of elements of stainless steel with class 4 "I" sections under fire and axial compression.

The numerical results are compared with the design methodology proposed in Eurocode 3 as well of other two proposals, evaluated the influence of several parameters like the type of steel and type cross section and finally it is performed a statistic evaluation of the numerical results.

Índice

Índice	XIII
Índice de Figuras	XV
Índice de Tabelas	XVIII
Nomenclatura.....	XIX
Lista de Acrónimos.....	XXI
1. Introdução	25
1.1. Considerações iniciais.....	25
1.2. Material	27
1.3. Motivação do estudo	32
1.4. Objetivos	32
1.5. Estrutura da dissertação	33
2. Regras de Cálculo	37
2.1. Classificação de secções transversais	37
2.1.1. Classificação de elementos internos	38
2.1.2. Classificação de elementos salientes	39
2.2. Cálculo de secções efetivas para classe 4	39
2.3. Cálculo da resistência de pilares a altas temperaturas de classe 4	40
2.3.1. Fenómenos de encurvadura	40
2.3.2. Propriedades mecânicas do aço	44
2.3.3. Cálculo da resistência	47
2.4. Outras propostas de cálculo	49
2.4.1. Anexo nacional francês	49
2.4.2. Manual EuroInox	50
3. Modelação Numérica.....	53
3.1. Considerações iniciais.....	53
3.2. Descrição geral do programa SAFIR	53

3.3.	Casos de estudo.....	54
3.4.	Definição do modelo numérico.....	55
4.	Análise de Resultados.....	61
4.1.	Influência dos parâmetros	62
4.1.1.	Influência do tipo de aço	62
4.1.2.	Influência da secção transversal	65
4.2.	Avaliação Estatística.....	76
5.	Considerações Finais	85
5.1.	Conclusões gerais	85
5.2.	Desenvolvimentos futuros	86
	Referencias Bibliográficas.....	88

Índice de Figuras

Figura 1 – Tipos de aço inoxidável (ESDEP, 2000).....	27
Figura 2 - Preços de placas laminadas a quente em Março de 2008 (Lopes, 2014b).....	29
Figura 3 - Evolução dos preços de placas laminadas a quente ao longo dos últimos anos (Lopes, 2014b).....	29
Figura 4 - Cryster Tower (EuroInox, 2000)	31
Figura 5 – Ponte pedonal do rio Sickal, Estocolmo (EuroInox, 2000).....	31
Figura 6 – Edifício de escritórios, Londres (EuroInox, 2000).....	32
Figura 7 - Dimensões para elementos internos (CEN, 2005b)	38
Figura 8 - Dimensões para elementos salientes (CEN, 2005b)	39
Figura 9 - Encurvadura de placa comprimida axialmente (Vila Real, 2010)	41
Figura 10 – Encurvadura local da secção 120x5 165x8 com vão de 1 metro	42
Figura 11 – Encurvadura global da secção 120x5 165x8 com vão de 1 metros.....	43
Figura 12 – Relação tensão-extensão do aço inoxidável a altas temperaturas (CEN, 2005b).....	44
Figura 13 - Comparação da relação tensão-extensão para o aço carbono S235 e aço inoxidável 1.4301 a 600°C (Lopes et al, 2012a).....	45
Figura 14 – Comparação do $k_{0,2p,\theta}$ entre várias classes de aço inoxidável e aço de carbono (CEN, 2005b).....	46
Figura 15 – Comparação do módulo de elasticidade ($K_{E,\theta}$) a altas temperaturas (CEN, 2005b).....	46
Figura 16 - Variação do valor $\sqrt{\frac{k_{0,2p,\theta}}{K_{E,\theta}}}$ de 5 classes de aço inoxidável com o aumento da temperatura (CEN, 2005b)	47
Figura 17 – Elemento finito de casca (Lopes, 2009).....	54
Figura 18 – Modelo numérico adotado.....	56
Figura 19 – Condições de apoio e carregamento dos elementos	57
Figura 20 – Condições de apoio (eixo fraco bloqueado).....	57
Figura 21 - Tensões residuais usadas no modelo numérico numa secção em I soldada (C-compressão; T-tensão) (Gardner, 2004).....	58
Figura 22 – Nós bloqueados ao longo do ponto médio de ambos os banzos	61
Figura 23 – Resultados numéricos para o pilar 250x6 200x8 de aço inoxidável de classe 1.4301	64

Figura 24 - Resultados numéricos para o pilar 250x6 200x8 de aço inoxidável de classe 1.4462	64
Figura 25 - Resultados numéricos para o pilar 250x6 200x8 de aço inoxidável de classe 1.4003	65
Figura 26 - Resultados numéricos para o pilar 115x5 165x8 de aço inoxidável de classe 1.4301 (alma de classe 2 e banzo de classe 4).....	66
Figura 27 - Resultados numéricos para o pilar 120x5 165x8 de aço inoxidável de classe 1.4301 (alma de classe 3 e banzo de classe 4).....	67
Figura 28 - Resultados numéricos para o pilar 150x5 135x8 de aço inoxidável de classe 1.4301 (alma de classe 4 e banzo de classe 2).....	67
Figura 29 - Resultados numéricos para o pilar 140x5 145x8 de aço inoxidável de classe 1.4301 (alma de classe 4 e banzo de classe 3).....	68
Figura 30 - Resultados numéricos para o pilar 165x5 165x8 de aço inoxidável de classe 1.4301 (alma de classe 4 e banzo de classe 4).....	68
Figura 31 - Resultados numéricos para o pilar 250x6 200x8 de aço inoxidável de classe 1.4301 (alma de classe 4 e banzo de classe 4).....	69
Figura 32 - Resultados numéricos para o pilar 105x5 155x8 de aço inoxidável de classe 1.4003 (alma de classe 2 e banzo de classe 4).....	70
Figura 33 - Resultados numéricos para o pilar 120x5 165x8 de aço inoxidável de classe 1.4003 (alma de classe 3 e banzo de classe 4).....	70
Figura 34 - Resultados numéricos para o pilar 130x5 115x8 de aço inoxidável de classe 1.4003 (alma de classe 4 e banzo de classe 2).....	71
Figura 35 - Resultados numéricos para o pilar 150x5 135x8 de aço inoxidável de classe 1.4003 (alma de classe 4 e banzo de classe 3).....	71
Figura 36 - Resultados numéricos para o pilar 165x5 165x8 de aço inoxidável de classe 1.4003 (alma de classe 4 e banzo de classe 4).....	72
Figura 37 - Resultados numéricos para o pilar 250x6 200x8 de aço inoxidável de classe 1.4003 (alma de classe 4 e banzo de classe 4).....	72
Figura 38 - Resultados numéricos para o pilar 77x5 115x8 de aço inoxidável de classe 1.4462 (alma de classe 2 e banzo de classe 4).....	73
Figura 39 - Resultados numéricos para o pilar 90x5 115x8 de aço inoxidável de classe 1.4462 (alma de classe 3 e banzo de classe 4).....	74
Figura 40 - Resultados numéricos para o pilar 95x5 92x8 de aço inoxidável de classe 1.4462 (alma de classe 4 e banzo de classe 2).....	74

Figura 41 - Resultados numéricos para o pilar 95x5 95x8 de aço inoxidável de classe 1.4462 (alma de classe 4 e banzo de classe 3).....	75
Figura 42 - Resultados numéricos para o pilar 150x5 135x8 de aço inoxidável de classe 1.4462 (alma de classe 4 e banzo de classe 4).....	75
Figura 43 - Resultados numéricos para o pilar 250x6 200x8 de aço inoxidável de classe 1.4462 (alma de classe 4 e banzo de classe 4).....	76
Figura 44 - Comparação estatística entre o EC3 e os resultados numéricos para todas as classes de aço.....	78
Figura 45 - Comparação estatística entre o A. N. Francês e os resultados numéricos para as todas classes de aço	79
Figura 46 - Comparação estatística entre o M. EuroInox e os resultados numéricos para a todas as classes de aço	79
Figura 47 – Comparação estatística entre o EC3 e os resultados numéricos para a classe 1.4301	80
Figura 48 - Comparação estatística entre o A. N. Francês e os resultados numéricos para a classe 1.4301	80
Figura 49 - Comparação estatística entre o M. EuroInox e os resultados numéricos para a classe 1.4301	81
Figura 50 - Comparação estatística entre o EC3 e os resultados numéricos para a classe 1.4003	81
Figura 51 - Comparação estatística entre o A. N. Francês e os resultados numéricos para a classe 1.4003	82
Figura 52 - Comparação estatística entre o M. EuroInox e os resultados numéricos para a classe 1.4003	82

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Tipos de aço inoxidável com as classes correspondentes (CEN, 2005c)	28
Tabela 2 – Classificação de elementos internos à compressão (CEN, 2006b).....	38
Tabela 3 - Classificação de elementos salientes à compressão (CEN, 2006b).....	39
Tabela 4 – Casos de estudo.....	55
Tabela 5 - Avaliação estatística referente à comparação entre as propostas analisadas e os resultados numéricos.....	77
Tabela 6 – Avaliação estatística referente à comparação entre as propostas analisadas e os resultados numéricos (aço 1.4301).....	77
Tabela 7 - Avaliação estatística referente à comparação entre as propostas analisadas e os resultados numéricos (aço 1.4003).....	77

Nomenclatura

Letras maiúsculas latinas

A_{eff}	Área efetiva
E	Módulo de elasticidade longitudinal do aço
E_a	Módulo de elasticidade longitudinal do aço à temperatura normal
$E_{a,\theta}$	Inclinação da reta que representa o domínio elástico para o aço a temperaturas elevadas θ_a
$E_{ct,\theta}$	Inclinação da tensão limite convencional de proporcionalidade
L	Comprimento do elemento
N_{CR}	Carga crítica de Euler
$N_{b,fi,t,Rd}$	Valor de cálculo da resistência à compressão, em situação de incêndio, no instante t

Letras minúsculas latinas

b_{eff}	Largura efetiva do elemento comprimido
\bar{b}	Largura livre do elemento
$f_{0,2p,\theta}$	Tensão limite convencional de proporcionalidade, referida à tensão de cedência a 20°C
$f_{u,\theta}$	Tensão última do aço
f_y	Tensão de cedência do aço a 20 °C
$f_{y,\theta}$	Tensão de cedência efetiva do aço a temperaturas elevadas θ_a
$k_{0,2p,\theta}$	Fator de redução para o valor de cálculo da tensão de cedência de secções de Classe 4
$k_{E,\theta}$	Fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico à temperatura do aço θ_a atingida no instante t
k_σ	Coeficiente de encurvadura local

Caracteres do alfabeto grego

α	Fator de imperfeição;
σ_{ED}	Tensão de compressão atuante;
σ_{CR}	Tensão crítica de encurvadura local;

ν	Coeficiente de Poisson
$\varepsilon_{c,\theta}$	Extensão total na tensão limite convencional de proporcionalidade a altas temperaturas
$\varepsilon_{u,\theta}$	Extensão última
ε	Extensão
$\gamma_{M1,fi}$	Coeficiente parcial de segurança de resistência de elementos sujeitos à encurvadura em situação de incêndio
γ_{M0}	Coeficiente parcial de segurança de resistência
$\varepsilon_{c,\theta}$	Extensão total na tensão limite convencional de proporcionalidade a altas temperaturas
$\bar{\lambda}_{\theta}$	Esbelteza normalizada em situação de incêndio
$\bar{\lambda}_p$	Esbelteza adimensional normalizada local
χ_{fi}	Coeficiente de redução
θ_a	Temperatura do aço
ρ	Fator de redução da largura efetiva

Lista de Acrónimos

CEN Comité Europeu de Normalização

EC3 Eurocódigo 3

EN Norma Europeia

EN 1993-1-1 Parte 1-1 do Eurocódigo 3

EN 1993-1-2 Parte 1-2 do Eurocódigo 3

EN 1993-1-4 Parte 1-4 do Eurocódigo 3

EN 1993-1-5 Parte 1-5 do Eurocódigo 3

MEF Método dos Elementos Finitos

SAFIR Safety Fire Resistance

Capítulo 1

Introdução

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

1.2 Material

1.3 Motivação do estudo

1.4 Objetivos

1.5 Estrutura da Dissertação

1. Introdução

1.1.Considerações iniciais

Na construção civil, mais especificamente na fase de projeto, o objetivo primordial é projetar estruturas seguras do modo mais económico possível. O aspeto financeiro é portanto muito importante nesta fase e, como tal, uma das decisões mais relevantes do projetista a esse nível é a escolha do material. No entanto, nem sempre a solução mais económica inicialmente é a que se adequa melhor, sendo que em alguns casos é preferível optar por materiais mais dispendiosos mas com características mais adequadas para determinadas condições. Um exemplo que caracteriza esta situação é o uso do aço inoxidável ao invés do tradicional aço de carbono em certas ocasiões.

O aço apresenta fraco desempenho a altas temperaturas (Vila Real, 2003), uma vez que, a elevada condutividade térmica que apresenta propícia a propagação da temperatura de uma forma mais acelerada e como consequência as propriedades mecânicas do aço degradam-se também de uma forma mais célere. Este é sujeito a altas temperaturas normalmente aquando da ocorrência de um incêndio. Apesar de uma situação de incêndio ser considerada acidente para fins de dimensionamento, estes ocorrem com alguma frequência. Assim sendo, e tendo em conta a forma como o aço se comporta quando sujeito a altas temperaturas, é necessário estudar para perceber como reagem as estruturas quando expostas a estas condições.

Os pilares são um dos elementos fulcrais de uma estrutura, se os mesmos não suportarem o que as cargas lhe exigem, podemos ter, como consequência, toda uma estrutura em risco. São estes elementos que vão direccionar todas as forças aplicadas na estrutura para as suas fundações, dissipando-se aí as mesmas. Em caso de incêndio, os pilares são normalmente condicionantes na resistência ao fogo, por esse motivo é essencial o bom dimensionamento e funcionamento dos mesmos. Para se alcançar esse feito, é necessário estudar e perceber como se comportam os vários materiais e perfis disponíveis.

Neste trabalho vão ser estudadas secções transversais de classe 4, que são segundo o Eurocódigo 3 (EC3), EN 1993-1-1, as secções “em que ocorre a encurvadura local antes de se atingir a tensão de cedência numa ou mais partes da secção transversal” (CEN,

2005a). No EC3 são apresentadas 4 classes, que classificam os perfis quanto à sua esbelteza, sendo os de classe 4 os perfis mais esbeltos.

Estudos recentes foram efetuados com algumas das características da presente dissertação, é fundamental conhecer e perceber o que se fez no passado para ser possível a realização de um bom trabalho.

Um estudo anterior de Lopes et al do ano de 2010, “Axially loaded stainless steel columns in case of fire” refere a resistência ao fogo de colunas com secção em I de aço inoxidável carregadas com esforço axial, mas apenas para classes 1 e 2. Este estudo concluiu que as fórmulas originalmente desenvolvidas para o aço de carbono que se encontram na Parte 1-2 do EC3 são inseguras para a encurvadura global por flexão provocada pelos esforços axiais em perfis I de aço inoxidável soldados a altas temperaturas, tanto sobre os eixos fracos como dos fortes.

Outro estudo envolvendo secções de classe 4 a altas temperaturas, é a investigação de Knobloch e Fontana (Knobloch & Fontana., 2006) e Quiel e Garlock (Quiel & Garlock, 2010) que concluíram que a metodologia utilizada para o cálculo de secções de classe 4 a altas temperaturas é conservativa.

Gardner et al, 2010 usou resultados de testes isotérmicos e anisotérmicos disponíveis para as várias classes de aço inoxidável e propôs um conjunto de valores de fatores de redução da tensão limite para elevadas temperaturas para cada classe. Comparou os seus fatores de redução com os dados pelo EN 1993-1-2 e concluiu que eram praticamente iguais aos propostos por si.

Um estudo feito por Euro Inox (EuroInox 2006) propôs que para determinar a classificação de uma secção transversal de aço inoxidável a altas temperaturas devia ser usada a fórmula para o ε de $\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right]^{0.5}$, sendo o resto das regras iguais ao Eurocódigo.

As regras de dimensionamento de elementos estruturais de aço inoxidável à temperatura normal estão estabelecidas na Parte 1-4 do EC3 EN 1993-1-4 (CEN, 2006a), em quanto que, a resistência ao fogo é referida na Parte 1-2 do mesmo Eurocódigo EN 1993-1-2 (CEN, 2005b). Nesta Parte 1-2 do EC3 é estabelecido que a resistência ao fogo de

elementos estruturais em aço inoxidável é calculada do mesmo modo que para o aço de carbono. No entanto, no anexo C do mesmo documento é apresentado o facto de estes aços terem leis constitutivas distintas, tanto para baixas como para altas temperaturas.

Nesta dissertação será usado o programa SAFIR, um software desenvolvido na Universidade de Liège (Franssen, 2007). Com este programa de elementos finitos de análise não-linear geométrica e material especificamente desenvolvido para a modelação do comportamento de estruturas sujeito a altas temperaturas, obter-se-ão resultados numéricos, que posteriormente vão ser usados para comparação com as regras prescritas no EC3 e ainda com outras propostas e metodologias existentes.

1.2. Material

Existem cinco grupos de aços inoxidáveis classificados segundo a sua estrutura metalúrgica, os martensíticos, ferríticos, austeníticos, austeníticos-ferríticos (duplex) e os de endurecimento por precipitação (Euro Inox, 2006). Cada um destes grupos varia consoante a sua composição química, tal como se pode verificar na figura 1.

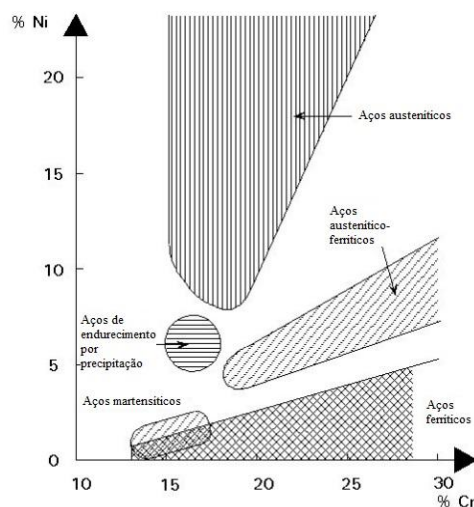


Figura 1 – Tipos de aço inoxidável (ESDEP, 2000)

Qualquer um dos grupos de aço inoxidável contém elementos como o níquel e o crómio, elementos esses que tornam este aço mais dispendioso em relação ao aço de carbono. Relativamente aos cinco grupos, os austeníticos são os que contêm mais níquel e os ferríticos pelo contrário, os que contêm menos.

A principal razão do preço de produção do aço inoxidável surge da percentagem de níquel, quanto maior a mesma, mais dispendioso se torna o aço. Assim, e, relacionado

com o que anteriormente foi exposto, os aços austeníticos são os que apresentam preços mais elevados e, por consequência os aços ferríticos os mais económicos.

As classes mais usadas de aços inoxidáveis nos diferentes grupos são o 1.4301 (também conhecido como 304) e 1.4401 (denominado frequentemente como 306) nos austeníticos, o 1.4003 nos ferríticos e o 1.4462 e um novo tipo, o lean duplex nos austenítico-ferríticos.

As diferentes composições químicas dos grupos alteram as suas características, sendo que os austeníticos apresentam uma boa combinação de corrosão e resistência às cargas, os ferríticos, apesar da menor percentagem de níquel apresentam também uma boa resistência à corrosão e uma boa resistência estrutural. Os duplex possuem uma elevada resistência estrutural, resistência ao desgaste e conjuntamente uma boa resistência à corrosão sob tensão (Rossi, 2010).

Na Parte 1-4 do EC3 são apresentados alguns dos tipos de aço inoxidável de acordo com a EN 10088-2 (CEN, 2005c).

Tabela 1 – Tipos de aço inoxidável com as classes correspondentes (CEN, 2005c)

Ferríticos	1.4003, 1.4016, 1.4512
Austeníticos	1.4306, 1.4307, 1.4541, 1.4301, 1.4401, 1.4404, 1.4539, 1.4571, 1.4432, 1.4435, 1.4311, 1.4406, 1.4439, 1.4529, 1.4547, 1.4318
Austeníticos-Ferríticos	1.4362, 1.4462

Como mencionado anteriormente o aço inoxidável é mais caro que o de carbono, nas seguintes figuras 2 e 3, é possível observar essa diferença de preços.

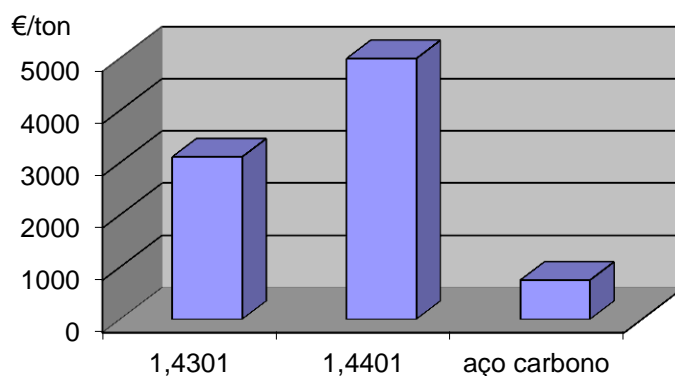


Figura 2 - Preços de placas laminadas a quente em Março de 2008 (Lopes, 2014b)

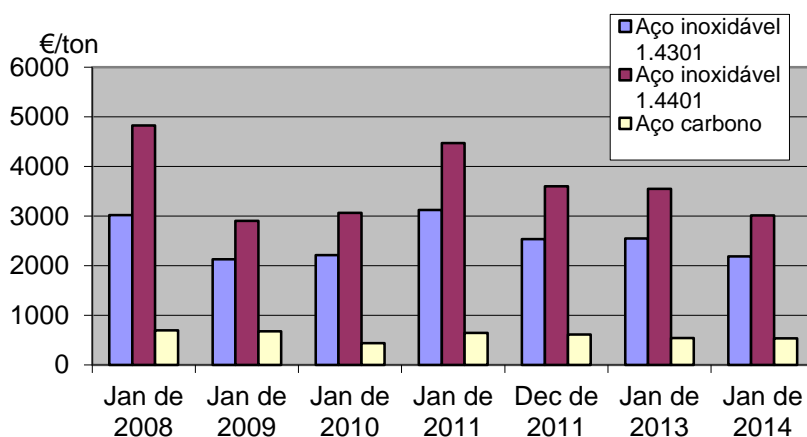


Figura 3 - Evolução dos preços de placas laminadas a quente ao longo dos últimos anos (Lopes, 2014b)

Na figura 2 são comparados os preços de placas laminadas a quente em Março de 2008, entre os aços inoxidáveis de classe 1.4301 e 1.4401 (austeníticos) com o aço carbono, que apesar de serem dados de uma data distante face à atual, são representativos das diferenças de preços.

A figura 3 evidencia a evolução dos preços de placas laminadas a quente ao longo dos anos, em simultâneo é possível verificar a comparação dos divergentes preços entre os diferentes aços.

Constata-se que o aço inoxidável implica um maior investimento inicial (EuroInox, 2006), investimento esse que a longo prazo se poderá verificar vantajoso. Existem diversas vantagens que tem vindo a tornar este material cada vez mais competitivo, entre elas, as enumeradas de seguida: apresenta um baixo custo de ciclo de vida, facilidade para garantir a sua manutenção, maior durabilidade, melhor aparência estética e melhor resistência a altas temperaturas. (Gardner, 2005).

A acrescentar às características acima mencionadas, está por ventura a sua maior qualidade, a resistência à corrosão. O aço inoxidável é bastante resistente à corrosão quando sujeito a ambientes mais agressivos (Palacios, 2005) e por essa razão tem sido utilizado essencialmente em estruturas localizadas à beira mar, instalações nucleares e químicas, entre outras.

Esta sua resistência à corrosão resulta de uma camada transparente, bem aderente de óxido e rica em cromo que se forma espontaneamente à superfície na presença do ar ou de outro qualquer ambiente oxidante. Caso se risque, ou tenha algum dano por corte, a camada superficial regenera-se imediatamente na presença de oxigénio.

Apesar das vantagens apresentadas este material continua a ser menos utilizado quando comparado ao aço de carbono. Regras de dimensionamento limitadas, número reduzido de secções disponíveis, falta de conhecimento dos benefícios adicionais da sua utilização como material estrutural e os seus custos são algumas das razões que levam os projetistas a não optarem por este material (Gardner, 2005).

Mesmo com a maior utilização do aço de carbono em relação ao aço inoxidável, a utilização deste tem vindo a aumentar nos últimos anos, sendo usados quer em aplicações estruturais quer não estruturais. Em algumas construções de referência mundial é possível de se observar a utilização do aço inoxidável.

A figura 4 (EuroInox, 2000) mostra a Chrysler Tower, em New York, USA, um edifício histórico de 1930 no qual se utilizou aço inoxidável como aplicação não estrutural. Com mais de 80 anos, este é um bom exemplo de como o aço inoxidável pode ser efetivamente uma boa solução a longo prazo. O edifício apresenta um bom aspeto visual, não necessitando de grandes cuidados de manutenção e encontra-se em excelentes níveis de conservação.



Figura 4 - Cryster Tower (EuroInox, 2000)

O aço inoxidável também pode ter uma função estrutural, como no exemplo apresentado na figura 5 (EuroInox, 2000), a ponte pedonal que atravessa o rio Sickal em Estocolmo. Optou-se por esta solução devido ao perigo de corrosão oriundo da grande quantidade de sal presente nas águas provenientes do mar Báltico.



Figura 5 – Ponte pedonal do rio Sickal, Estocolmo (EuroInox, 2000)

Outro exemplo é a figura 6 (EuroInox, 2000), um edifício de escritórios em Londres, com uma arquitetura muito particular. De modo a ser possível a entrada de luz solar através de uma janela da igreja adjacente, o edifício é mais alto junto a outro edifício de escritórios e vai decrescendo no sentido da igreja. Todo o edifício é revestido a aço inoxidável.



Figura 6 – Edifício de escritórios, Londres (EuroInox, 2000)

1.3.Motivação do estudo

Como referido, o EC3 estabelece que as fórmulas para o cálculo da resistência de elementos estruturais de aço inoxidável são iguais às do aço de carbono a altas temperaturas. O facto de estes dois materiais terem diferentes leis constitutivas a altas temperaturas e usarem as mesmas metodologias de cálculo da resistência do elemento, torna fundamentais os estudos com elementos estruturais em aço inoxidável nesta situação. Esta evidência advém não só da incerteza provocada pelas diferentes leis constitutivas dos materiais, mas também, da análise a estudos anteriores, onde os mesmos concluíram que em alguns casos a metodologia do EC3 é insegura nas referidas condições.

Assim surge a motivação e pertinência deste trabalho, pois os estudos aqui apresentados ainda não foram realizados anteriormente, sendo assim, mais um contributo para a compreensão do comportamento do aço inoxidável quando sujeito a altas temperaturas nas diferentes condições de carregamentos e apoios.

1.4.Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é realizar uma análise ao comportamento de pilares com secção em I de classe 4 de aço inoxidável quando sujeitas a esforço axial a altas temperaturas. Para auxiliar esta análise foi realizado um estudo numérico utilizando o programa anteriormente referido, o SAFIR. Com auxílio do programa serão

alcançados resultados numéricos que serão comparados com os resultados calculados através das metodologias usadas no EC3 e ainda outras propostas e posteriormente analisados.

1.5.Estrutura da dissertação

A estrutura da dissertação divide-se em 5 capítulos:

No capítulo 2 é dedicado ao cálculo estrutural segundo o Eurocódigo 3, desde a classificação de secções ao cálculo da resistência de secções.

No capítulo 3 é dedicado à modelação numérica, onde se faz uma breve descrição dos programas utilizados e onde se define o modelo numérico utilizado.

No capítulo 4 é apresentado a avaliação de resultados, onde se faz uma discussão dos resultados segundo alguns parâmetros e ainda uma avaliação estatística dos resultados obtidos pelo SAFIR.

Por fim no capítulo 5 apresentam-se as principais conclusões a retirar da presente dissertação.

Capítulo 2

Regras de Cálculo

2 Regras de Cálculo

2.1 Classificação das secções transversais

2.2 Cálculo de secções efetivas para classe 4

2.3 Cálculo da resistência de pilares a altas temperaturas de classe 4

2.4 Outras propostas de cálculo

2. Regras de Cálculo

2.1. Classificação de secções transversais

Segundo a EN 1993-1-1, o objetivo da classificação de secções transversais é identificar em que medida a resistência e a capacidade de rotação destas secções é limitada pela ocorrência de encurvadura local. Para classificar as secções transversais são definidas quatro classes, sendo elas:

- a) Classe 1: aquelas em que se pode formar uma rótula plástica, com a capacidade de rotação necessária para uma análise plástica, sem redução da sua resistência;
- b) Classe 2: secções transversais que podem atingir o momento resistente plástico, mas cuja capacidade de rotação é limitada pela encurvadura local;
- c) Classe 3: são aquelas em que a tensão na fibra extrema comprimida, calculada com base numa distribuição elástica de tensões, pode atingir o valor da tensão de cedência, mas em que a encurvadura local pode impedir que o momento resistente plástico seja atingido;
- d) Classe 4: secções transversais em que ocorre a encurvadura local antes de se atingir a tensão de cedência numa ou mais partes da secção.

A classificação de uma secção transversal depende da relação entre a largura e a espessura dos elementos comprimidos sob o carregamento a que está sujeita, nesta dissertação todas as secções se encontram comprimidas, pelo facto de se tratar de pilares que apenas estão sujeitos a esforços axiais.

Segundo a EN 1993-1-4 (5.2.2), as secções transversais devem ser classificadas como classe 1, 2, 3 ou 4 dependendo dos limites, como apresentados na tabela 1 e 2. Quando os elementos não cumprem os critérios para classe 3, deverão ser considerados de classe 4.

Depois de se classificar a nível de elementos internos e salientes, adota-se para o perfil a pior situação, ou seja, a que der a classificação maior dos dois.

Como referido anteriormente, na dissertação são tratadas apenas secções transversais de classe 4, no entanto estas foram escolhidas de modo a ter combinações de elementos

internos de classe 4 e elementos salientes de classes inferiores (Classe 2 e 3) e vice-versa.

As fórmulas apresentadas em seguida são para aço inoxidável a temperatura ambiente, sendo que para altas temperaturas a parte 1-2 indica que, para efeitos de regras simplificadas, as secções transversais poderão ser classificadas tal como à temperatura normal, mas com o valor reduzido igual a:

$$\varepsilon = 0,85 \left[\frac{235}{f_y} \right]^{0,5} \quad (1)$$

em que, f_y é a tensão de cedência a 20°C.

2.1.1. Classificação de elementos internos

De seguida, na tabela 2 apresentam-se os valores limites da relação entre as dimensões dos elementos comprimidos das Classes 1, 2 e 3 para elementos internos (alma).

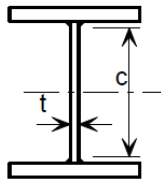


Figura 7 - Dimensões para elementos internos (CEN, 2005b)

Tabela 2 – Classificação de elementos internos à compressão (CEN, 2006b)

<i>Classificação</i>	<i>Compressão</i>
1	$c/t \leq 25,7\varepsilon$
2	$c/t \leq 26,7\varepsilon$
3	$c/t \leq 30,7\varepsilon$

onde, $\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]$

em que:

$E=200\,000\text{ N/mm}^2$ para os austeníticos-ferríticos de classe 1.4362 e 1.4462 e grande parte dos austeníticos, por exemplo de classe 1.4401, 1.4301 entre outros.

$E=195\,000\text{ N/mm}^2$ para as exceções nos austeníticos, classes 1.4539, 1.4529 e 1.4547.

$E=220\,000\text{ N/mm}^2$ para os ferríticos de classe 1.4003, 1.4016 e 1.4512.

2.1.2. Classificação de elementos salientes

Na tabela 3 apresentam-se os valores limites da relação entre as dimensões dos elementos comprimidos das Classes 1, 2 e 3 para elementos externos (banzo).

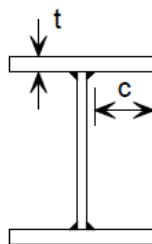


Figura 8 - Dimensões para elementos salientes (CEN, 2005b)

Tabela 3 - Classificação de elementos salientes à compressão (CEN, 2006b)

<i>Classificação</i>	<i>Compressão</i>
1	$c/t \leq 9\varepsilon$
2	$c/t \leq 9,4\varepsilon$
3	$c/t \leq 11\varepsilon$

onde, $\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$

em que E é igual ao utilizado nos elementos internos.

2.2. Cálculo de secções efetivas para classe 4

Segundo a EN 1993-1-4 (5.2.3), para o cálculo de secções efetivas para a temperatura ambiente de classe 4 deve-se usar a EN 1993-1-5 com as seguintes alterações:

Para elementos internos:

$$\rho = \frac{0,722}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,125}{\bar{\lambda}_p^2} \quad (2)$$

Para elementos salientes:

Enformados a frio

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,231}{\bar{\lambda}_p^2} \quad (3)$$

Soldadas

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,242}{\bar{\lambda}_p^2} \quad (4)$$

com:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\frac{\bar{b}}{t}}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad (5)$$

Sendo que para altas temperaturas a secções efetiva é calculada de igual forma para temperatura ambiente.

2.3.Cálculo da resistência de pilares a altas temperaturas de classe 4

2.3.1. Fenómenos de encurvadura

O objetivo deste estudo, já anteriormente referido prende-se com o comportamento de secções em I de aço inoxidável de classe 4, para uma boa análise do mesmo, tem que se ter em conta um dos aspetos mais importantes: os fenómenos de encurvadura. Estes fenómenos, em especial a encurvadura local verificam-se sempre nos perfis de classe 4.

2.3.1.1. Encurvadura local

Fenómeno que assume uma grande importância nas secções de classe 4 (Simões da Silva, 2007). A encurvadura local das secções afeta os resultados da análise global duma estrutura, devendo ser assim considerada no seu dimensionamento (CEN, 2005b). Para o dimensionamento de secções de classe 4, a EN 1993-1-1 indica que se deve ter em conta os efeitos da encurvadura local conforme o instruído na EN 1993-1-5 (CEN, 2006b).

Para melhor compreender o conceito deste fenómeno de instabilidade é apresentado um exemplo, onde placas vão ser comprimidas axialmente e assim originar encurvadura local.

Em 1891, Bryan estudou o fenómeno numa placa retangular, com espessura t , simplesmente apoiada no seu contorno e submetida a uma tensão de compressão uniforme, conforme apresentado na figura 9 (Simões da Silva, 2007).

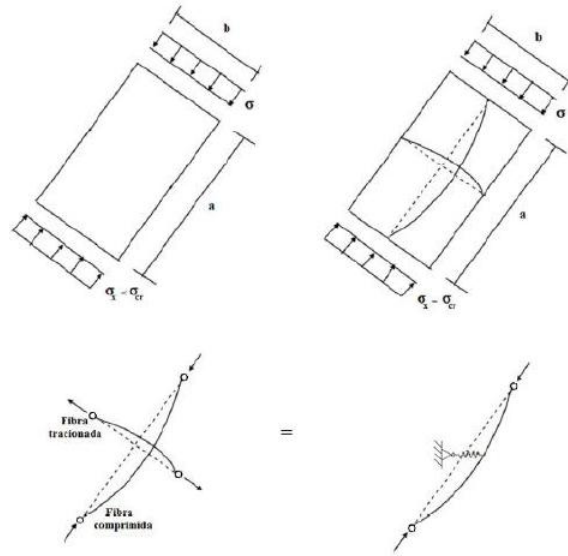


Figura 9 - Encurvadura de placa comprimida axialmente (Vila Real, 2010)

Na figura 9 está representado o momento em que a tensão de compressão exercida σ_{ED} na placa é igual ou maior à tensão crítica de encurvadura local σ_{CR} .

$$\sigma_{CR} = k_{\sigma} \frac{E\pi^2}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$$

Onde σ_{CR} representa a tensão crítica de encurvadura local, t é a espessura da placa, b diz respeito ao comprimento da fibra na direção perpendicular à carga e k_{σ} é o coeficiente de encurvadura. Assim, quando a σ_{ed} é igual ou superior σ_{CR} ocorre encurvadura, caso contrário, não surge este fenómeno.

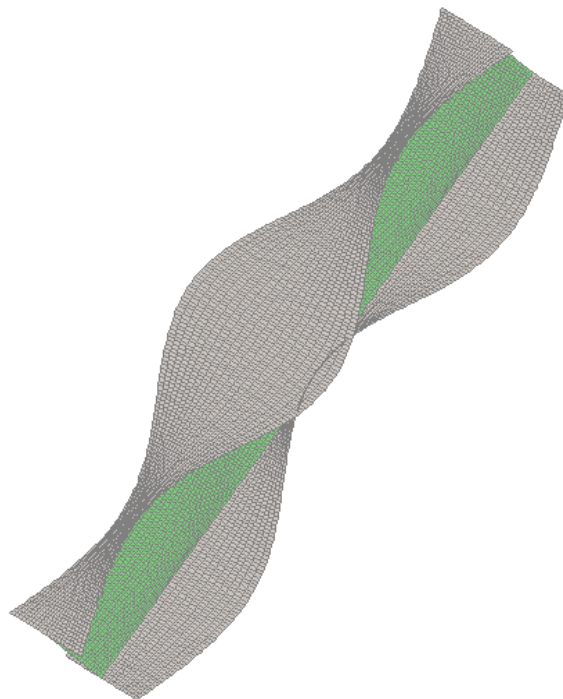


Figura 10 – Encurvadura local da secção 120x5 165x8 com vão de 1 metro

Na figura 10 está um exemplo de encurvadura local de um pilar estudado nesta dissertação. De referir que para se perceber melhor o efeito deste fenómeno foi alterada a escala no Diamond, programa de onde se retirou a imagem, de modo a aumentar o efeito visual, pois, na realidade estas deformações são mais pequenas e menos perceptíveis.

2.3.1.2. Encurvadura global

Os fenómenos de instabilidade global são caracterizados pela deformação do eixo longitudinal da barra, sendo que as secções transversais que continuam o perfil sofrem apenas deslocamentos de corpo rígido (de rotação e/ou translação). No caso estudado ao longo deste trabalho, este fenómeno de instabilidade global é a instabilidade de pilares por flexão (“varejamento”) (Pinto 2010).

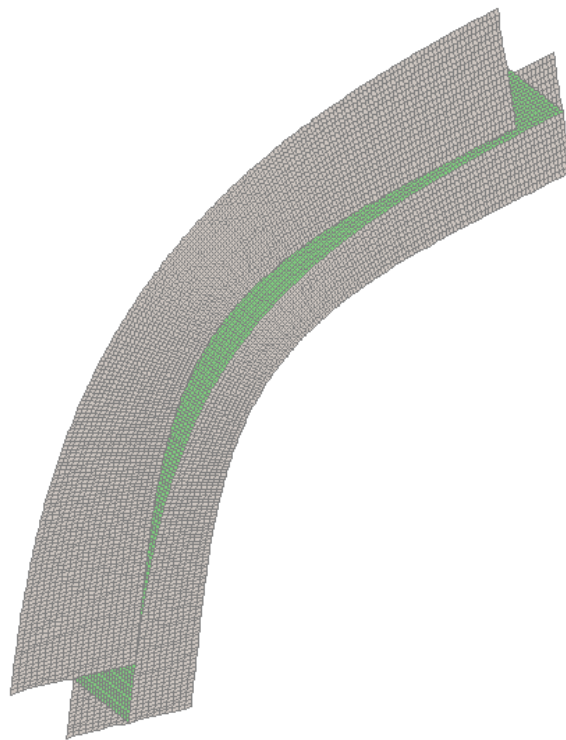


Figura 11 – Encurvadura global da secção 120x5 165x8 com vão de 1 metros

Na figura 11 é possível ver o fenómeno de encurvadura global, a imagem foi retirada do programa Diamond de um dos perfis estudados.

Quando os pilares são sujeitos a uma força P de compressão e essa mesma força ultrapassa a sua carga crítica, o pilar entra em equilíbrio instável e deforma-se. A essa carga crítica dá-se o nome de carga crítica de Euler.

A carga crítica de Euler é a mais pequena força de compressão capaz de fazer com que a barra conserve uma forma ligeiramente fletida.

$$N_{CR} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad (6)$$

O explicado anteriormente foi considerando um pilar “perfeito”, ou seja, sem se ter em conta tensões residuais, imperfeições geométricas e/ou materiais. No entanto, na realidade as barras não são perfeitas e a resistência dos pilares é, em geral, menor que a carga crítica de Euler já definida. Nesta dissertação realizou-se uma análise num programa de elementos finitos, SAFIR. Segundo o EN 1993-1-5 anexo C, para este tipo de análise devem ser consideradas as imperfeições. É crucial não ignorar estas imperfeições, apesar de em muitos estudos se considerar os elementos perfeitos (sem

imperfeições), há que ter em conta que nunca o serão e por isso quanto mais nos aproximarmos da realidade mais fiáveis serão os resultados obtidos.

2.3.2. Propriedades mecânicas do aço

Para a melhor compreensão de todos os cálculos que ajude a chegar à resistência de um pilar a altas temperaturas, é necessário incluir as propriedades mecânicas do seu material e perceber como reage quando sujeito a altas temperaturas.

Nas propriedades mecânicas, quando o aço inoxidável é sujeito a temperaturas elevadas, ocorrem alterações na sua tensão de cedência (f_y) e no seu módulo de elasticidade (E).

Na EN 1993-1-2, é possível observar-se (figura 12) a relação tensão-extensão para o aço inoxidável a altas temperaturas. Na mesma figura é ainda possível distinguir-se duas zonas, a zona quase linear até à tensão limite de proporcionalidade de tensão $f_{0,2p,\theta}$ e a zona curva até à tensão última $f_{u,\theta}$.

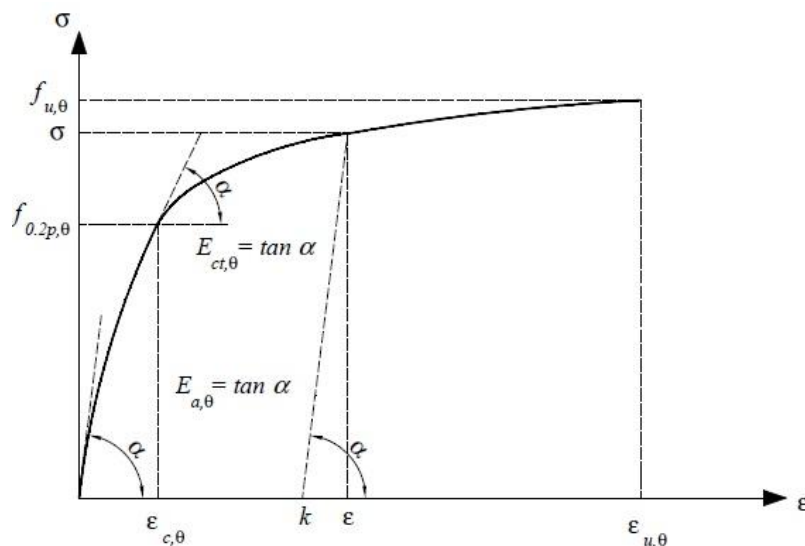


Figura 12 – Relação tensão-extensão do aço inoxidável a altas temperaturas (CEN, 2005b)

Na figura temos, $E_{a,\theta}$, inclinação da reta que representa o domínio elástico, $E_{ct,\theta}$, corresponde à inclinação da tensão limite convencional de proporcionalidade, $\epsilon_{c,\theta}$, à extensão total na tensão limite convencional de proporcionalidade e $\epsilon_{u,\theta}$, representa a extensão última.

Como se pode averiguar na figura 13, o gráfico representativo da lei constitutiva do material é sempre não linear, pelo que a tensão de cedência (f_y) não está bem definida

(Lopes & Vila Real, 2011). Pelo contrário, o gráfico representativo do aço de carbono apresenta um comportamento linear elástico até atingir a tensão de cedência, seguindo-se uma zona de patamar até à tensão de endurecimento (CEN, 2005b). Pode-se ainda observar na figura a diferença entre o gráfico tensão extensão do aço de carbono S235 e o aço inoxidável 1.4301 a 600 °C, onde se percebe que o aço inoxidável tem um comportamento ao fogo diferente do aço de carbono. A EN 1993-1-2, define que a tensão de cedência para o aço inoxidável a altas temperaturas para as classes 1, 2 e 3 corresponde a uma extensão de 2% ($f_{2,\theta}$). Para a classe 4, a que é exposta neste trabalho, por ser uma classe menos estudada e também pela possível ocorrência de encurvadura local, a sua tensão de cedência corresponde a uma extensão de 0,2% ($f_{0,2p,\theta}$).

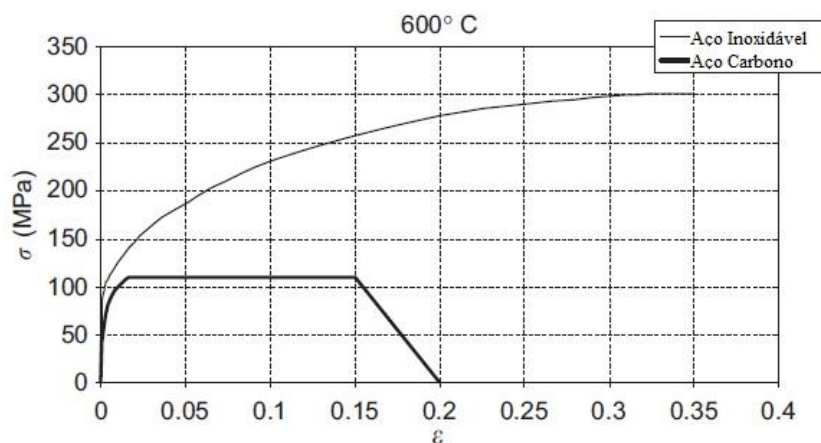


Figura 13 - Comparação da relação tensão-extensão para o aço carbono S235 e aço inoxidável 1.4301 a 600°C (Lopes et al, 2012a)

Na figura 14 compara-se o fator de redução da tensão limite ($k_{0,2p,\theta}$) entre várias classes de aço inoxidável e o aço de carbono a diferentes temperaturas. É possível observar que a classe 1.4003 tem um comportamento diferente das restantes.

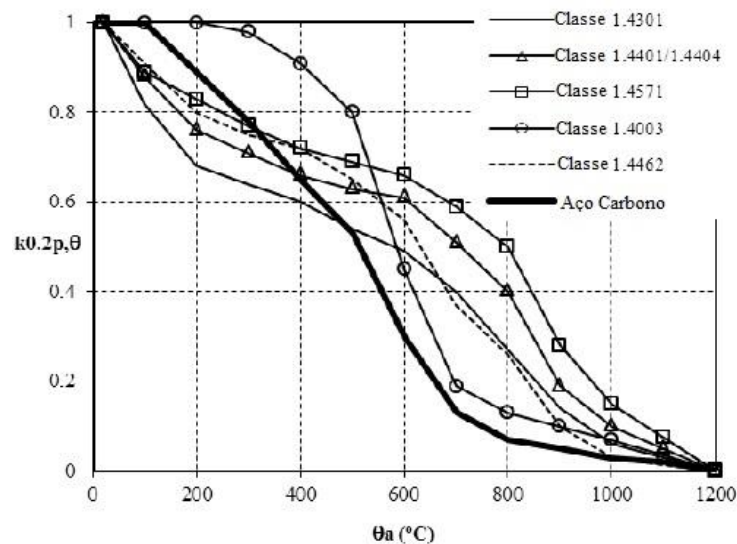


Figura 14 – Comparação do $k_{0,2p,\theta}$ entre várias classes de aço inoxidável e aço de carbono (CEN, 2005b)

Na figura 15 é apresentada a redução do módulo de elasticidade ($k_{E,\theta}$) com a temperatura, observa-se também a comparação entre o aço inoxidável e o aço de carbono. Na figura nota-se que a 800°C há uma diferença significativa do módulo de elasticidade entre o aço inoxidável e o aço de carbono, sendo que para o aço inoxidável o fator de redução é mais elevado. A temperaturas mais elevadas que 800°C é também notório um decréscimo acentuado do módulo de elasticidade no aço inoxidável, acontecimento este verificável em todas as classes deste aço (Lopes, 2009).

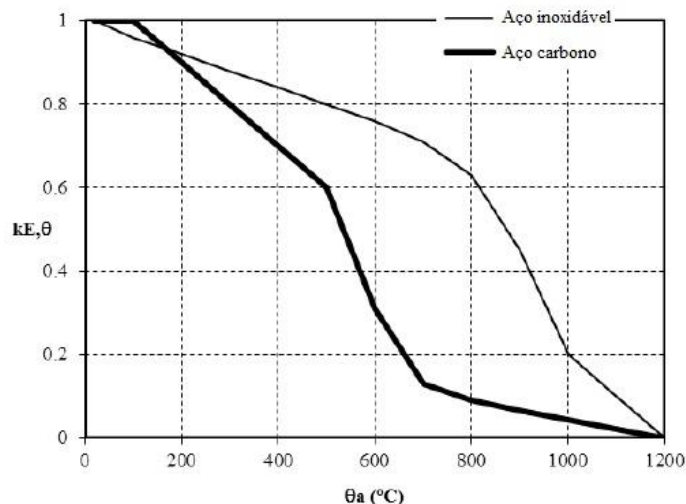


Figura 15 – Comparação do módulo de elasticidade ($K_{E,\theta}$) a altas temperaturas (CEN, 2005b)

Na figura anterior conclui-se mais uma vez, o que vem sendo já afirmado ao longo deste trabalho: o aço inoxidável quando sujeito a altas temperaturas tem um melhor comportamento mecânico que o aço de carbono.

Na figura 16 é possível observa-se a relação da variável $\sqrt{\frac{k_{0,2p,\theta}}{k_{E,\theta}}}$ com o aumento de temperatura. Com a análise à figura pretende-se perceber qual a diferença entre o cálculo a frio e o comportamento ao fogo na expressão da esbelteza normalizada:

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{0,2p,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (7)$$

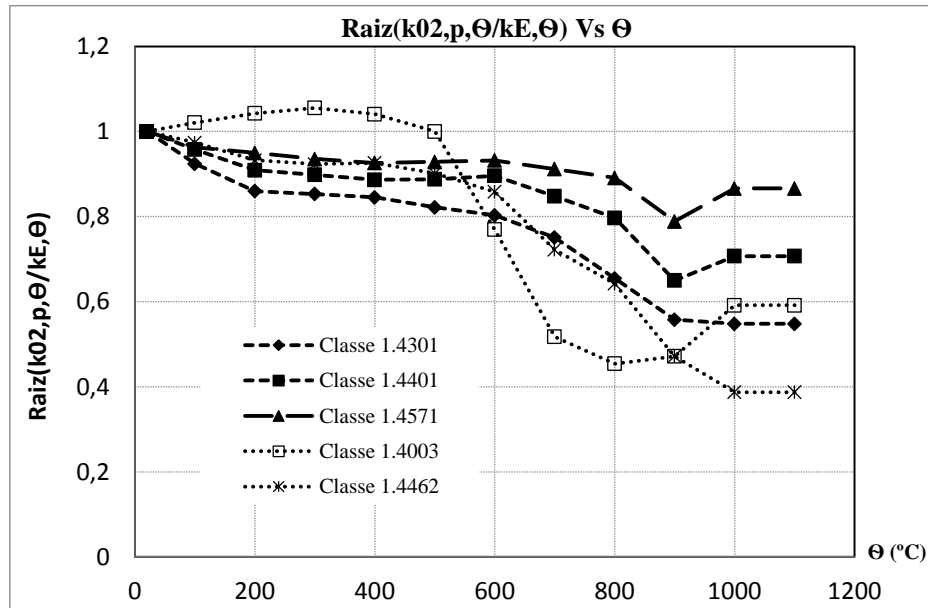


Figura 16 - Variação do valor $\sqrt{\frac{k_{0,2p,\theta}}{k_{E,\theta}}}$ de 5 classes de aço inoxidável com o aumento da temperatura (CEN, 2005b)

Na figura é possível observar que este valor tem na sua maior parte um decréscimo ao longo do aumento da temperatura, o que indica que a esbelteza normalizada ao fogo irá ser inferior à temperatura normal. Pode-se examinar ainda que a classe 1.4003 tem um comportamento diferente de todos os outros, onde se denota um repentino decréscimo do valor sensivelmente aos 500°C.

2.3.3. Cálculo da resistência

Para o cálculo da resistência em situação de incêndio o Anexo E da EN 1993-1-2 (CEN, 2005b) indica que o valor da tensão de cedência deverá ser considerado igual à tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2%.

Ainda no Anexo supracitado, no ponto E.2. (4) é referido o valor para o cálculo da tensão de cedência a altas temperaturas $f_{0,2p,\theta}$ para secções transversais de Classe 4, calculado por:

$$k_{0,2p,\theta} = \frac{f_{0,2p,\theta}}{f_y} \quad (8)$$

sendo $k_{0,2p,\theta}$ o fator de redução de cálculo determinado a partir do Quadro C1 do Anexo C da norma referida anteriormente.

O valor de cálculo da resistência segundo o Anexo E do EC3, para secções de Classe 4 à compressão será igual ao descrito no ponto 4.2.3.2, sendo este:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A_{eff} k_{0,2p,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (9)$$

em que:

χ_{fi} coeficiente de redução para a encurvadura por flexão em situação de incêndio;

$k_{0,2p,\theta}$ fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura θ_a atingida no instante t.

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{\theta} + \sqrt{\varphi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} \quad (10)$$

com:

$$\varphi_{\theta} = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_{\theta} + (\bar{\lambda}_{\theta})^2 \right] \quad (11)$$

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (12)$$

A esbelteza normalizada $\bar{\lambda}_{\theta}$ para a temperatura θ_a , é obtida por:

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{k_{0.2p,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (13)$$

com:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} \quad (14)$$

onde:

α é o fator de imperfeição

2.4.Outras propostas de cálculo

De forma a analisar os resultados numéricos obtidos através do programa SAFIR, será efetuada uma comparação com os resultados do EC3, como já afirmado e ainda com as propostas do Anexo Nacional Francês e o Manual EuroInox.

2.4.1. Anexo nacional francês

A proposta apresentada no Anexo Nacional Francês da EN 1993-1-2 (CEN, 2006b) para classe 4 difere ligeiramente da do EC3, havendo pequenas alterações, tais como o acréscimo de $\bar{\lambda}_\theta$, ficando então $N_{b,fi,t,Rd}$:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A_{eff} k_{0.2p,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (15)$$

e o coeficiente φ_θ altera-se para:

$$\varphi_\theta = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_\theta - 0,2) + (\bar{\lambda}_\theta)^2 \right] \quad (16)$$

com:

$$\alpha = 0,49$$

2.4.2. Manual EuroInox

A proposta do Manual EuroInox (EuroInox, 2006) apenas difere do EC3 em relação à fórmula do coeficiente φ_θ , ficando assim:

$$\varphi_\theta = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_\theta - \bar{\lambda}_0) + (\bar{\lambda}_\theta)^2 \right] \quad (17)$$

onde, para:

Elementos soldados secções abertas (eixo forte):

$$\alpha = 0,49$$

$$\bar{\lambda}_0 = 0,20$$

Elementos soldados secções abertas (eixo fraco):

$$\alpha = 0,76$$

$$\bar{\lambda}_0 = 0,20$$

Capítulo 3

Modelação Numérica

3 Modelação Numérica

3.1 Considerações iniciais

3.2 Descrição geral do programa SAFIR

3.3 Casos de estudo

3.4 Definição do modelo numérico

3. Modelação Numérica

3.1.Considerações iniciais

Para a análise estrutural da resistência ao fogo nesta dissertação foi usado um programa de cálculo baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), um método complexo quando comparado com outros de cálculo mais simplificados como os definidos nos Eurocódigos. O software usado na análise numérica nesta dissertação foi o SAFIR (Franssen, 2007) e neste capítulo vai ser descrita a sua base de funcionamento. Outro software utilizado foi o Ruby (Couto et al, 2013), um software de interface do SAFIR com o programa Cast3m para a execução da análise de encurvadura de modelos, com o objetivo de resolver as análises de encurvadura produzidas pelo SAFIR.

3.2.Descrição geral do programa SAFIR

O SAFIR (Franssen, 2007) é um programa proposto especialmente para a análise de estruturas à temperatura ambiente e a elevadas temperaturas, baseando-se no MEF e desenvolvido na Universidade de Liège, Bélgica.

O SAFIR pode ser usado para estudar o comportamento de estruturas de uma, duas ou três-dimensões. Como um programa de MEF, o SAFIR acomoda modelos de diversos tipos de elementos, processos de cálculo e materiais para determinar a relação tensão-extensão. Este possui dois modos distintos de cálculo: um para análise do comportamento térmico e outro para a análise do comportamento mecânico do elemento. A evolução não uniforme da temperatura é calculada para cada tipo de secção existente na estrutura (análise térmica). De seguida, o modo do comportamento mecânico do programa lê estas temperaturas e determina o comportamento termodinâmico da estrutura numa análise incremental (análise mecânica).

Nesta dissertação usaram-se elementos finitos de casca, pois por se tratar de secções de classe 4 a ocorrência de fenómenos de encurvadura local é bastante provável. O uso de elementos de casca é o método mais preciso quando se estuda o comportamento de elementos estruturais de paredes finas. Estes elementos de casca usados no SAFIR são baseados na teoria de flexão de Kirchhoff e são caracterizados pela sua capacidade de combinar o estado de resistência à flexão com forças axiais no meio da superfície. Os

elementos de casca do SAFIR têm quatro pontos de integração na superfície do elemento, como se pode ver na figura 17. Em cada direção, a integração é feita pelo método de Gauss e o número de integrações na espessura pode ser escolhida desde duas a nove camadas. São quatro nós com seis graus de liberdade cada, três deslocamentos e três rotações.

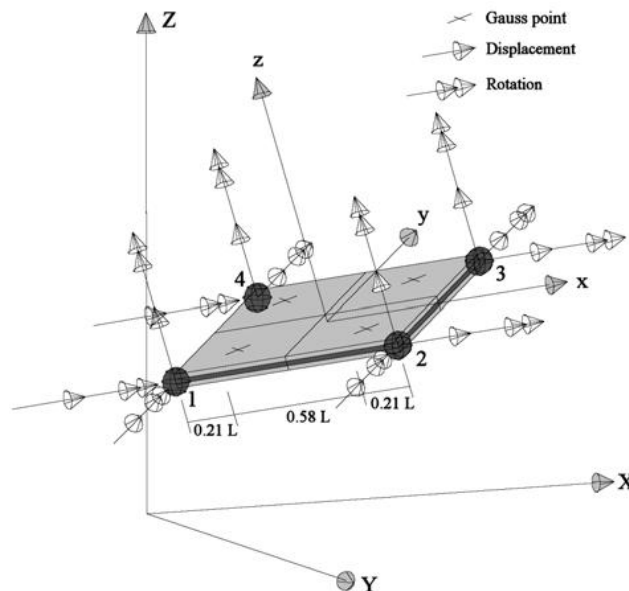


Figura 17 – Elemento finito de casca (Lopes, 2009)

3.3. Casos de estudo

Para esta dissertação optou-se por escolher os grupos e classes mais comuns, sendo eles o aço austenítico 1.4301, o aço ferrítico 1.4003 e o aço austenítico-ferrítico 1.4462. Os pilares a estudar são todos com secções de classe 4 e os seus comprimentos de um a dezassete metros. Estes comprimentos foram necessários, para garantir que em todos os aços, secções e temperaturas, a esbelteza atingisse sempre pelo menos o valor de dois.

Na escolha das secções optou-se por combinações de elementos internos (alma) de classe 4 e externos de classe 2 e 3 e o inverso, elementos externos (banzo) de classe 4 e internos de classe 2 e 3. Começou-se por definir espessuras para o banzo (oito mm) e para a alma (5 mm), em seguida foram definidos os seus comprimentos de modo a conseguir as combinações explicadas anteriormente. No entanto, por existir uma secção relativamente superior às restantes, a 250x6 200x8, optou-se, para nesta situação aumentar a espessura do elemento interno para 6mm.

A tabela 4 mostra os casos de estudo, sendo a nomenclatura para as secções do seguinte tipo: “altura da alma”x”espessura da alma” “largura dos banzos”x“espessura dos banzos”.

Tabela 4 – Casos de estudo

Secção	Classe					
	1.4301		1.4003		1.4462	
	Internos	Salientes	Internos	Salientes	Internos	Salientes
250x6 200x8	C4	C4	C4	C4	C4	C4
150x5 135x8	C4	C2	C4	C3	C4	C4
165x5 165x8	C4	C4	C4	C4	-	-
140x5 145x8	C4	C3	-	-	-	-
120x5 165x8	C3	C4	C3	C4	-	-
115x5 165x8	C2	C4	-	-	-	-
105x5 155x8	-	-	C2	C4	-	-
130x5 115x8	-	-	C4	C2	-	-
90x5 115x8	-	-	-	-	C3	C4
77x5 115x8	-	-	-	-	C2	C4
95x5 95x8	-	-	-	-	C4	C3
95x5 92x8	-	-	-	-	C4	C2

3.4.Definição do modelo numérico

Para a definição do modelo numérico, devido à sua complexidade e variantes como as secções e comprimentos, o refinamento da malha foi realizado com o auxílio de uma folha de cálculo automático, facilitando assim o processo de criação do modelo. A malha utilizada no estudo tem então as seguintes características: 12261 nós; 12000 elementos; analisando transversalmente a secção a alma contém 20 elementos; ambos os banzos contêm também 20 elementos; ao longo de todo o comprimento do pilar existem 100 elementos (ver figura 18).

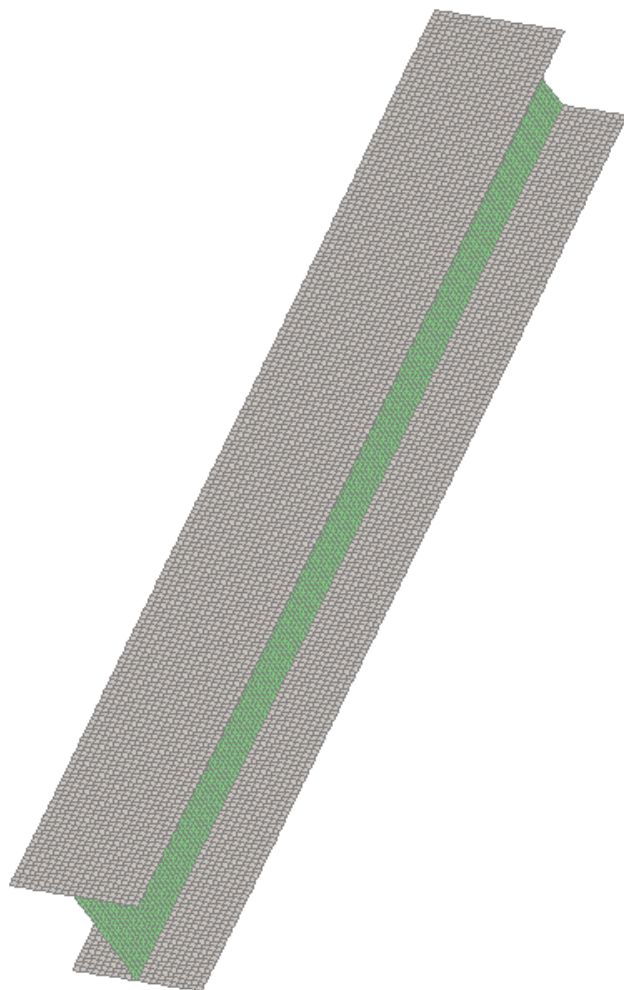


Figura 18 – Modelo numérico adotado

Em relação às condições de apoio, pretendeu-se simular uma situação de apoio simples no pilar, para isso foram impostas restrições nas suas extremidades. Foram então aplicadas restrições na perpendicular da direção dos banzos, ao longo de toda a sua largura e na alma também na perpendicular da sua direção em toda a sua altura. As figuras 19 e 20 mostram então as condições de apoio e carregamento do pilar.



Figura 19 – Condições de apoio e carregamento dos elementos

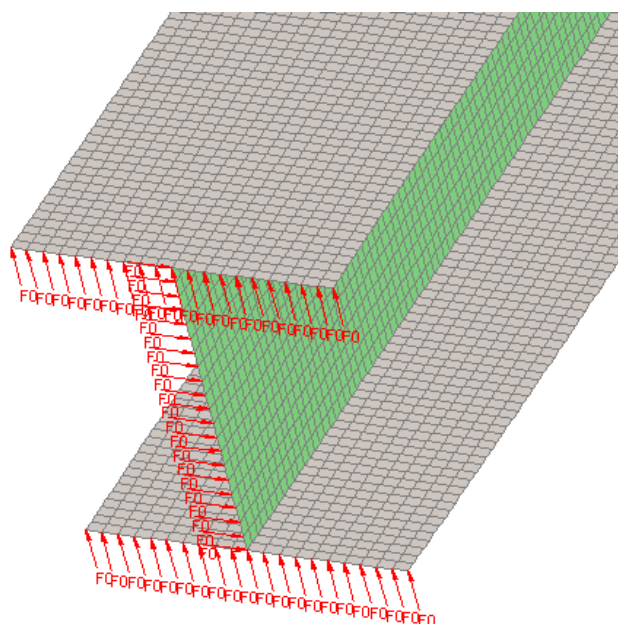


Figura 20 – Condições de apoio (eixo fraco bloqueado).

Adicionou-se também ao modelo numérico as tensões residuais típicas do aço carbono em secções soldadas, considerando essas tensões constantes em toda a espessura dos banzos e alma, como mostrado na figura 21 (Gardner, 2004).

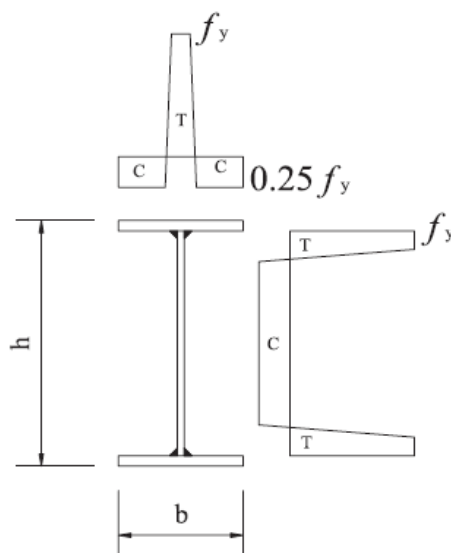


Figura 21 - Tensões residuais usadas no modelo numérico numa secção em I soldada (C-compressão; T-tensão) (Gardner, 2004).

No modelo numérico consideram-se ainda as imperfeições geométricas, as mesmas foram introduzidas com o programa Cast3M com o auxílio do Ruby (Couto et al, 2013), um software de interface para a execução da análise de encurvadura de modelos SAFIR. Este software cria ficheiros de entrada SAFIR, originando modelos com imperfeições geométricas. Só a partir deste último ficheiro é que é possível fazer a análise do modelo numérico. O Ruby cria ficheiros “output”, neles origina-se o primeiro modo de encurvadura global e o primeiro modo de encurvadura local. No presente estudo apenas se considerou o modo de encurvadura global e local para os comprimentos de um metro, sendo que para comprimentos iguais e superiores a três metros foi considerado apenas o modo de encurvadura global em duas direções. O facto de não conter o modo encurvadura local em alguns dos elementos tem pouca influência nos resultados (Arrais, 2012).

Os modelos foram ensaiados a altas temperaturas, 350°C, 500°C, 600°C e 700°C, com uma distribuição uniforme em toda a secção, para facilitar a comparação com as curvas do EC3 assim como com as das outras propostas.

Capítulo 4

Análise de Resultados

4 Análise de Resultados

4.1 Influência dos parâmetros

4.2 Avaliação estatística

4. Análise de Resultados

Após definido o modelo numérico, para obtenção de resultados e a respetiva análise, serão comparados os resultados obtidos no SAFIR com o EC3, a proposta do Manual EuroInox e a do Anexo Nacional Francês. Para essa comparação, optou-se por um método que permitisse uma análise acessível e prática, a utilização de gráficos, onde as ordenadas são dadas pelos valores de χ e as abscissas pelos valores de λ_θ . Os gráficos serão criados para todas as secções e para todos os tipos de aço, abrangendo as várias temperaturas que se definiram para este estudo.

As coordenadas dos resultados numéricos serão então dadas por λ_θ e χ , sendo o cálculo da esbelteza λ_θ conforme o mencionado anteriormente no capítulo 2, equações (13) e (14). O χ é dado pelo quociente entre a carga última do elemento calculado através do SAFIR para cada comprimento de todas as temperaturas estudadas e o esforço axial resistente da secção a cada temperatura. O valor do esforço axial resistente da secção foi calculado através do SAFIR bloqueando os comprimentos de 1 metro, nas duas direcções e todos os nós no ponto médio de ambos os banzos como mostra a figura 22.

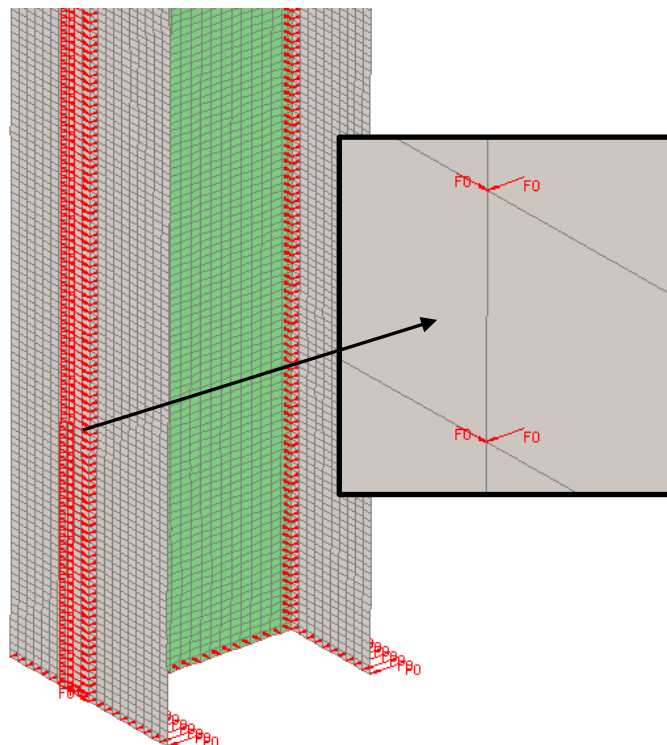


Figura 22 – Nós bloqueados ao longo do ponto médio de ambos os banzos

A curva correspondente ao Eurocódigo 3 foi obtida através da ligação de vários pontos onde a esbelteza λ_θ é calculada da mesma forma que os resultados numéricos e o χ calculado pela equação (10) mencionada no capítulo 2. Já as curvas do Anexo Nacional Francês e do Manual EuroInox são igualmente dadas pela ligação de pontos onde λ_θ e χ são calculados do mesmo modo que no EC3, mas com as alterações nos coeficientes φ_θ apresentadas nas equações (16) e (17), respetivamente.

4.1. Influência dos parâmetros

Os parâmetros a ser analisados neste subcapítulo serão o tipo aço e a secção transversal, onde se pretende comparar com o EC3 e restantes propostas com a finalidade de retirar conclusões sobre a influência dos parâmetros analisados.

4.1.1. Influência do tipo de aço

Para mostrar a influência do tipo de aço, foi escolhida uma secção transversal que tenha sido estudada nos três tipos de aço contemplados nesta dissertação. A escolhida foi a 250x6 200x8, que em todos os aços é uma secção de classe 4 quer no banzo quer na alma.

Nas figuras, encontram-se pontos, devidamente legendados, que representam os resultados numéricos de cada uma das temperaturas. Nas linhas, quer sejam as contínuas, ou as tracejadas, estão as representações das curvas do EC3 e das outras duas propostas apresentadas ao longo da dissertação. A figura 23 apresenta os resultados da classe 1.4301 (austenítico) e as figuras 24 e 25 das classes 1.4462 (austenítico-ferrítico) e 1.4003 (ferrítico), respetivamente.

Na figura 23, representativa da classe 1.4301 pode observar-se comparando a curva da EN 1993-1-2 com os resultados numéricos obtidos, que todos os pontos se encontram do lado da segurança. Em esbeltezas menos elevadas apresentam-se resultados demasiado conservativos, que, com o aumento da esbelteza se aproximam da curva do EC3. No gráfico da classe 1.4662 os resultados numéricos obtidos comportam-se com a mesma evolução. Já em relação ao gráfico da classe 1.4003 os resultados são significativamente mais dispersos e apresentam alguns pontos do lado da insegurança, pontos estes que correspondem principalmente à temperatura mais elevada das que foram testadas, 700°C.

Relativamente à proposta do Anexo Nacional Francês, quase todos os resultados do SAFIR se encontram do lado da insegurança para o aço 1.4301 que apresenta apenas alguns pontos do lado da segurança em esbeltezas menores. Quanto ao aço 1.4662 a grande maioria dos pontos encontram-se do lado da segurança com os resultados muito próximos da curva da proposta. Finalmente o aço 1.4003 encontra-se maioritariamente do lado da insegurança, apresentando resultados dispersos mas com tendência a, nas temperaturas menores (350°C e 500°C) estarem mais próximos do lado da segurança comparativamente às temperaturas mais elevadas (600°C e 700°C).

Quanto à proposta do Manual EuroInox para os aços 1.4301 e 1.4662 os resultados numéricos encontram-se do lado da segurança, o mesmo acontece, com a maioria dos resultados para o aço 1.4003, com exceção dos referentes à temperatura de 700°C, na qual os pontos estão do lado oposto, o da insegurança.

Depois de todos os resultados numéricos obtidos, observa-se que no aço 1.4003 (ferrítico) há uma maior dispersão de resultados e uma tendência para nas temperaturas mais elevadas, principalmente 700°C se fixarem do lado da insegurança. Os resultados numéricos para as quatro temperaturas desta classe diferem com um intervalo maior entre si, comparativamente aos outros dois aços. Este comportamento repete-se para praticamente todos os casos de estudo desta dissertação e pode ser explicado pelo apresentando no capítulo 2 no ponto 2.4.1, mais especificamente na figura 16. Outro facto que se observa em praticamente todos os casos estudados é nos resultados numéricos, à medida que a esbelteza vai aumentando os seus valores tenderem a aproximar-se das curvas. O duplex (1.4462) é a classe que apresenta ter maiores valores de resistência, enquanto que o Anexo Nacional Francês é a proposta que se aproxima mais dos resultados numéricos

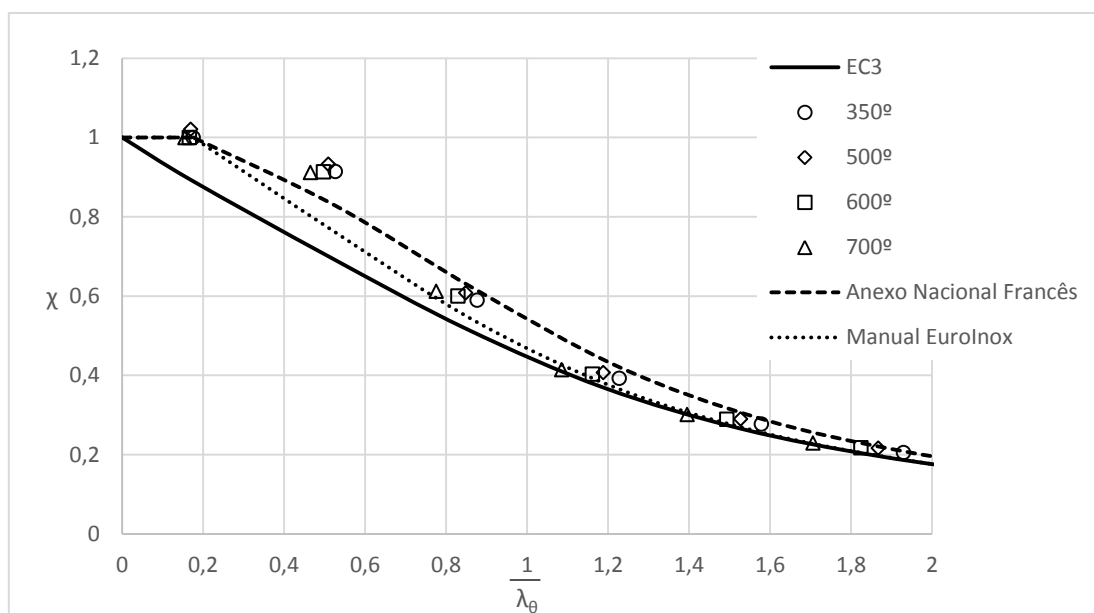


Figura 23 – Resultados numéricos para o pilar 250x6 200x8 de aço inoxidável de classe 1.4301

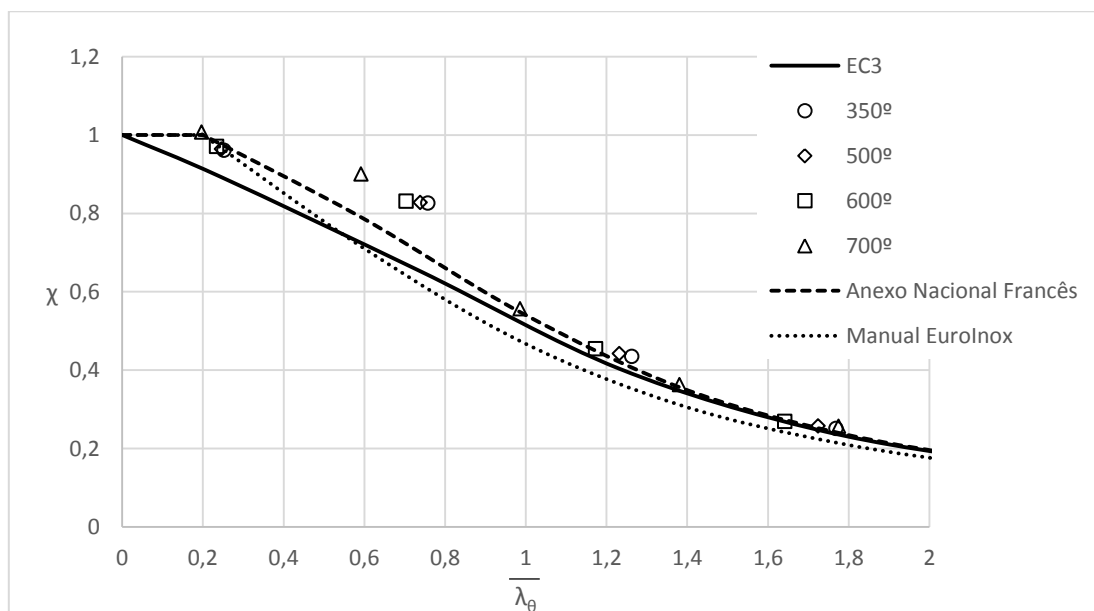


Figura 24 - Resultados numéricos para o pilar 250x6 200x8 de aço inoxidável de classe 1.4462

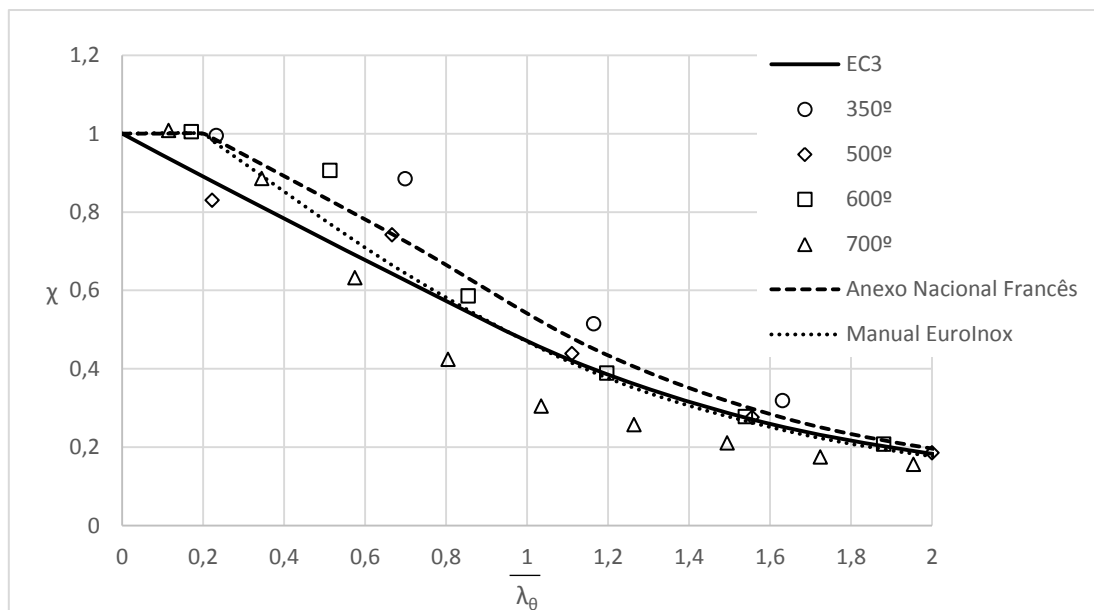


Figura 25 - Resultados numéricos para o pilar 250x6 200x8 de aço inoxidável de classe 1.4003

4.1.2. Influência da secção transversal

A secção transversal foi o outro parâmetro estudado na influência dos resultados, sendo assim objeto de estudo a esbelteza das secções. Para analisar este parâmetro foram variadas as classes do banzo e alma, mas de modo a que a secção transversal fosse sempre classificada como classe 4. Para tal, fez-se variar as dimensões de secção de modo a ter combinações de alma classe 4 e banzo classe 3 (e vice-versa), alma classe 4 e banzo classe 2 (e vice-versa), alma e banzo de classe 4 e ainda, de novo alma e banzo de classe 4 mas com esbeltezas superiores. Este estudo foi realizado para os três tipos de aço, 1.4301, 1.4003 e 1.4662 para assim perceber a influência da esbelteza em cada um deles.

4.1.2.1. Influência da secção transversal no austenítico (1.4301)

Observando os resultados numéricos obtidos conclui-se que o Eurocódigo 3 está do lado da segurança, pois todos os pontos, nas várias combinações estudadas se encontram desse mesmo lado. No entanto, para esbeltezas menores o EC3 encontra-se bastante conservativo, havendo uma aproximação dos resultados numéricos à curva para esbeltezas mais elevadas. De salientar que os pontos representativos das temperaturas mais elevadas (600°C e 700°C) têm uma ligeira tendência a estar mais perto da curva comparando com as de temperaturas mais baixas (350°C e 500°C). Verifica-se ainda que

quando a classe da alma e banzo é 4 (figura 30 e 31) à uma maior aproximação à curva da secção mais esbelta (figura 31).

O Anexo Nacional Francês não se encontra do lado da segurança em comparação com os resultados obtidos pelo SAFIR para alguns dos pontos com esbeltezas superiores (de 0,8 a 2), em quanto que para esbeltezas menores (de 0 a 0,8) encontram-se sempre do lado da segurança. Constata-se ainda que esta proposta é a que mais se aproxima dos resultados numéricos apesar de ser também a que mais pontos tem do lado da insegurança.

Quanto à proposta do Manual EuroInox, atesta-se que apenas na temperatura de 700°C alguns pontos se encontram ligeiramente do lado da insegurança, sendo a maioria quando a secção é muito esbelta (figura 31).

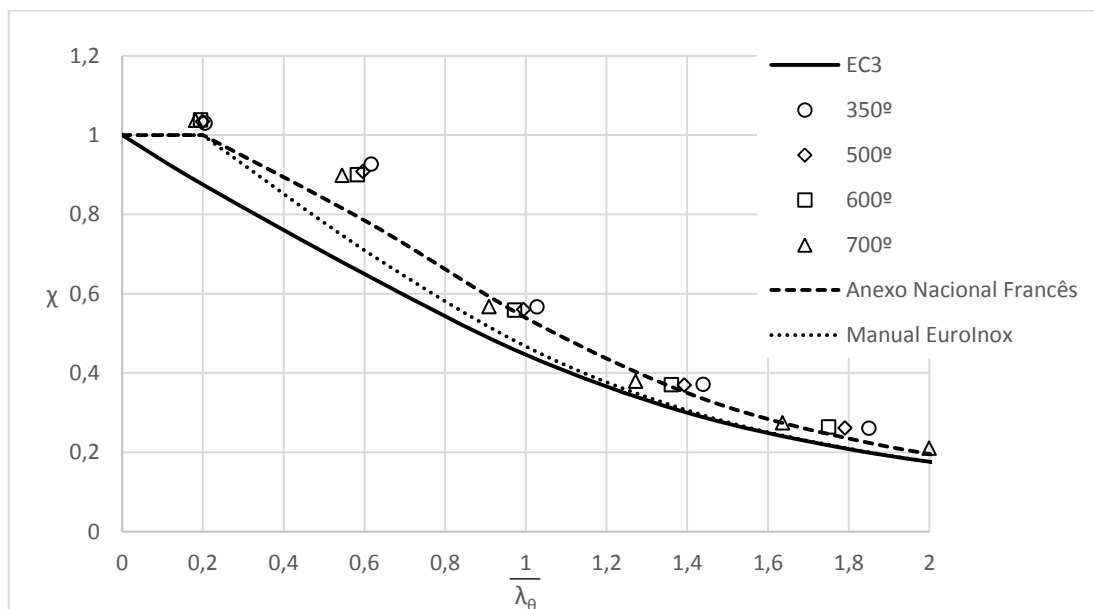


Figura 26 - Resultados numéricos para o pilar 115x5 165x8 de aço inoxidável de classe 1.4301 (alma de classe 2 e banzo de classe 4)

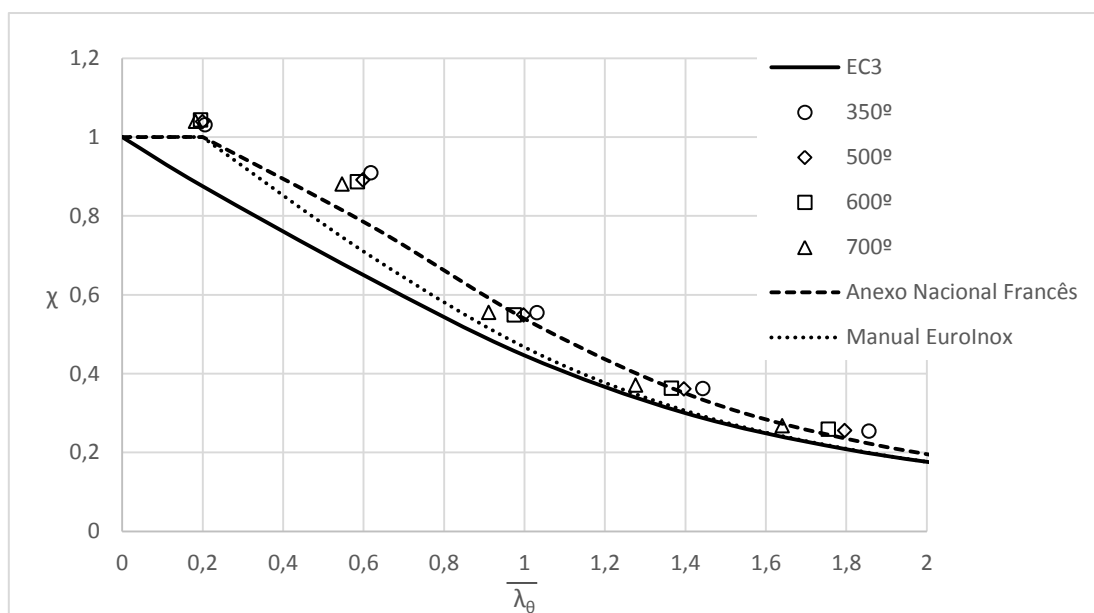


Figura 27 - Resultados numéricos para o pilar 120x5 165x8 de aço inoxidável de classe 1.4301 (alma de classe 3 e banzo de classe 4)

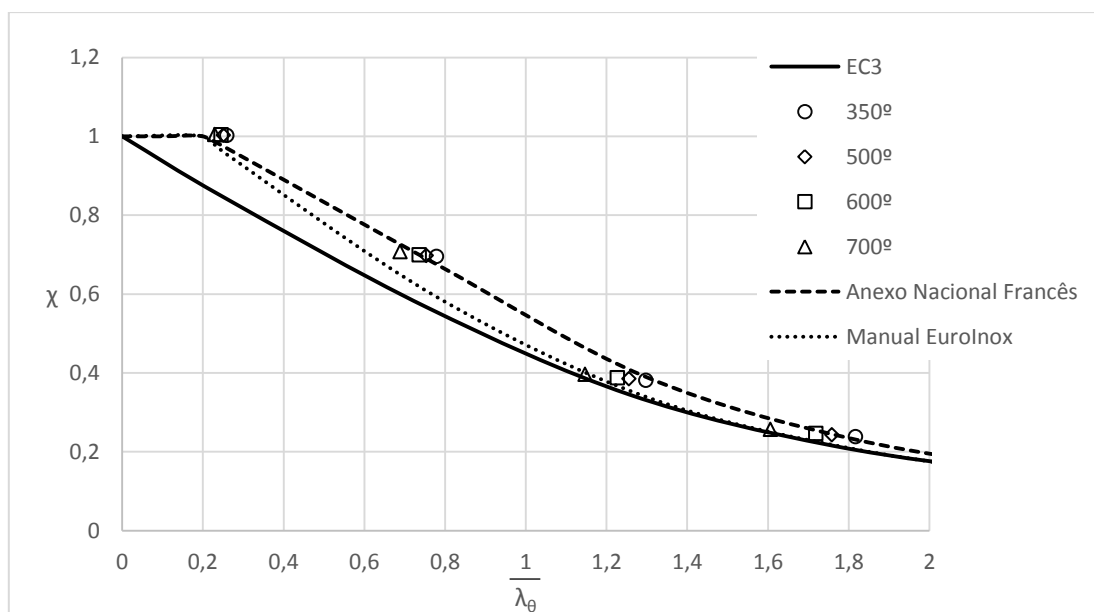


Figura 28 - Resultados numéricos para o pilar 150x5 135x8 de aço inoxidável de classe 1.4301 (alma de classe 4 e banzo de classe 2)

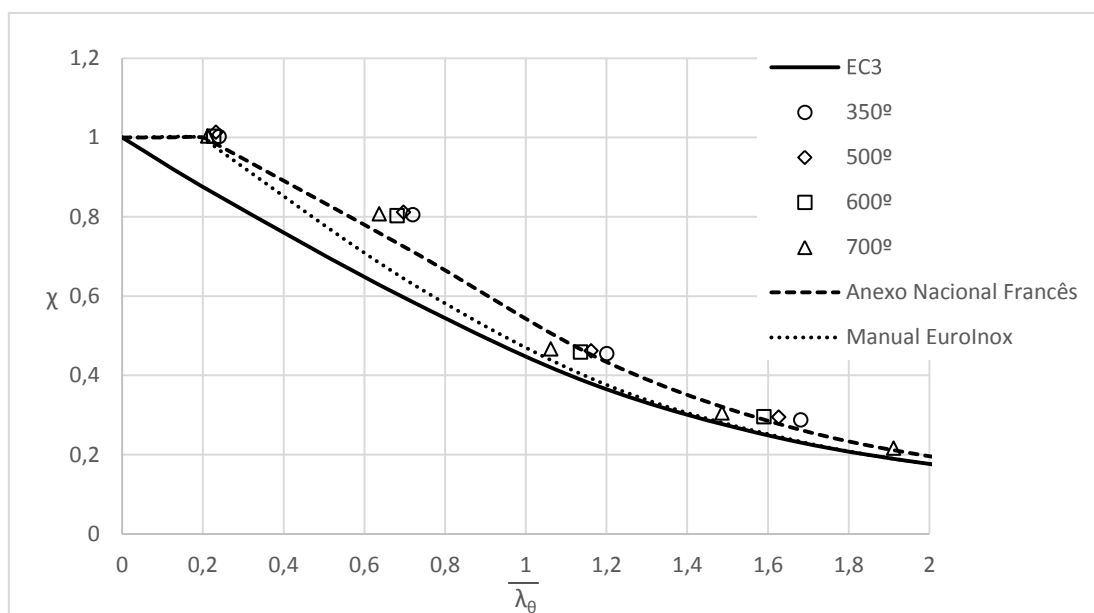


Figura 29 - Resultados numéricos para o pilar 140x5 145x8 de aço inoxidável de classe 1.4301 (alma de classe 4 e banzo de classe 3)

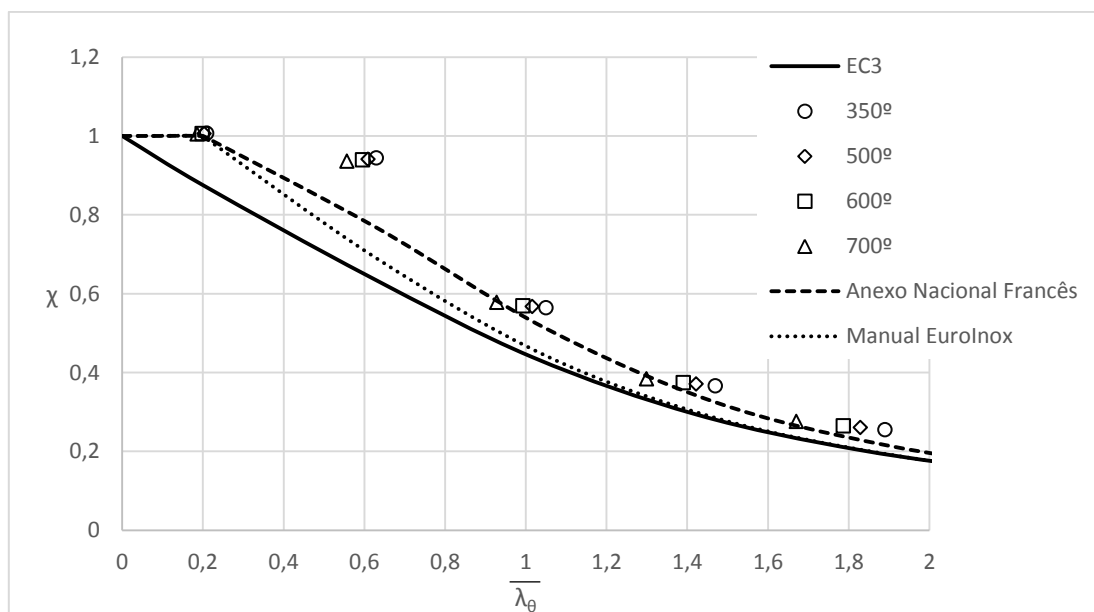


Figura 30 - Resultados numéricos para o pilar 165x5 165x8 de aço inoxidável de classe 1.4301 (alma de classe 4 e banzo de classe 4)

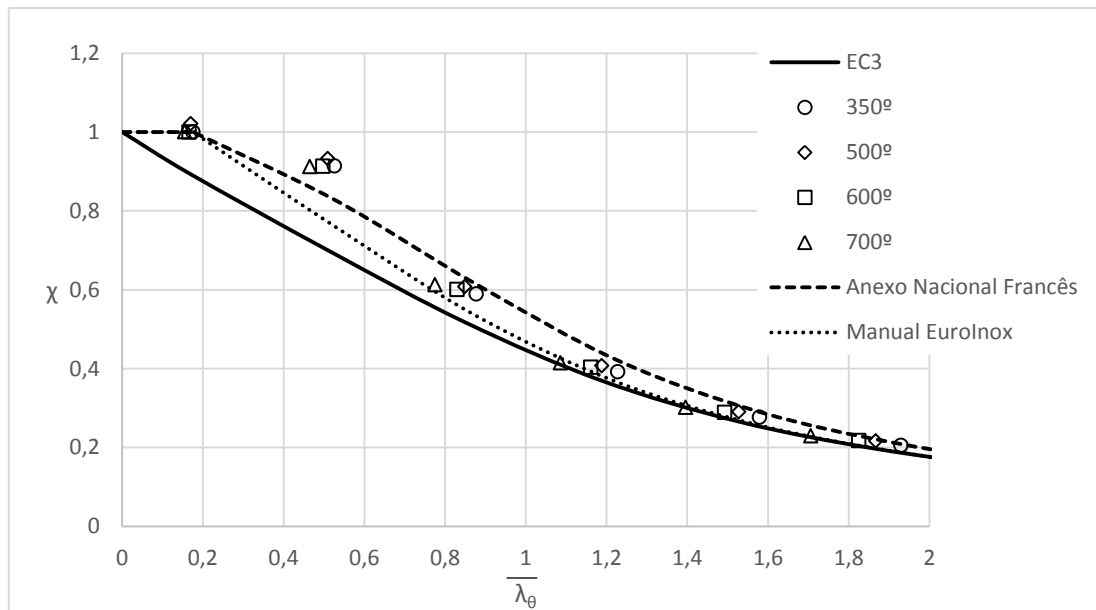


Figura 31 - Resultados numéricos para o pilar 250x6 200x8 de aço inoxidável de classe 1.4301 (alma de classe 4 e banzo de classe 4)

4.1.2.2. Influência da secção transversal no ferrítico (1.4003)

Como referido e explicado anteriormente, o aço ferrítico apresenta geralmente resultados numéricos muito dispersos, tendo tendência para nas temperaturas mais elevadas apresentar valores do lado da insegurança.

Em relação ao Eurocódigo 3 em geral para as temperaturas mais baixas (350°C e 500°C) os resultados do SAFIR encontram-se do lado da segurança, para 600°C ocorre uma aproximação à curva. Finalmente para as temperaturas mais elevadas, 700°C, estes encontram-se do lado da insegurança, com exceção aos pontos com esbeltezas mais baixas (de 0 a 0,4) que se encontram do lado da segurança. De realçar que para as secções com o banzo de classe 2 e 3 (figura 34 e 35) os pontos relativos às temperaturas de 350°C, 500°C e 600°C se aproximam da curva em relação aos perfis com o banzo de classe 4. Verifica-se ainda que quando a classe da alma e banzo é 4 os resultados numéricos da secção mais esbelta (figura 37) tornam-se mais inseguros comparando com a secção menos esbelta (figura 36)

O Anexo Nacional Francês não se encontra do lado da segurança, constatando-se que uma parte dos reduzidos pontos do lado da segurança têm esbeltezas menores (de 0 a 0,4) e temperaturas mais baixas (350°C e 500°C).

Em relação à proposta do Manual EuroInox este tem uma análise muito semelhante à do EC3, estando maioritariamente do lado da segurança, mas apresentando a generalidade dos pontos relativos à temperatura de 700°C do lado da insegurança.

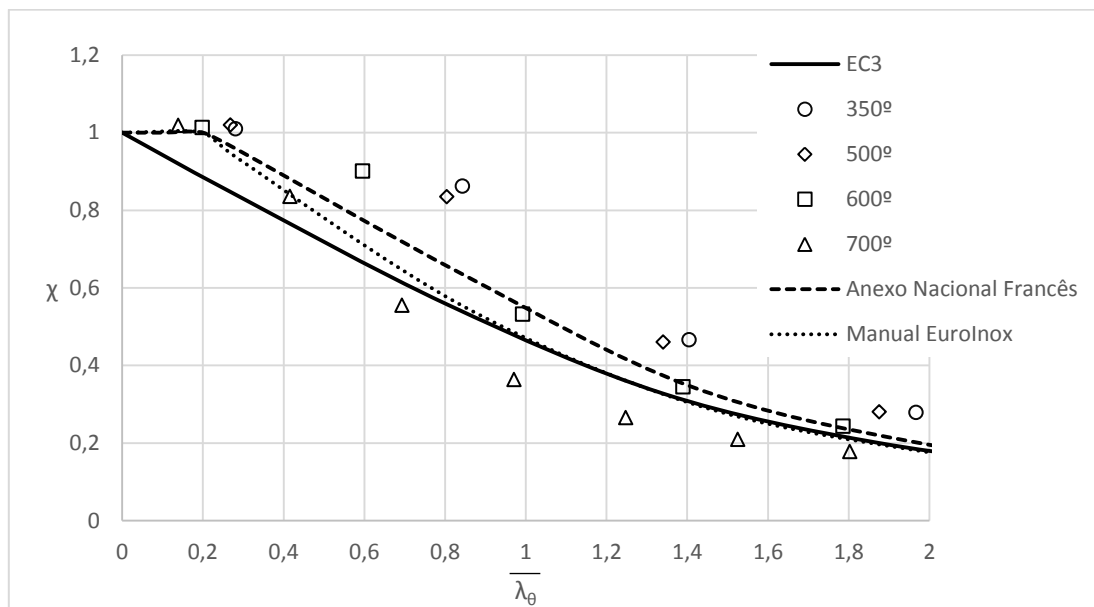


Figura 32 - Resultados numéricos para o pilar 105x5 155x8 de aço inoxidável de classe 1.4003 (alma de classe 2 e banzo de classe 4)

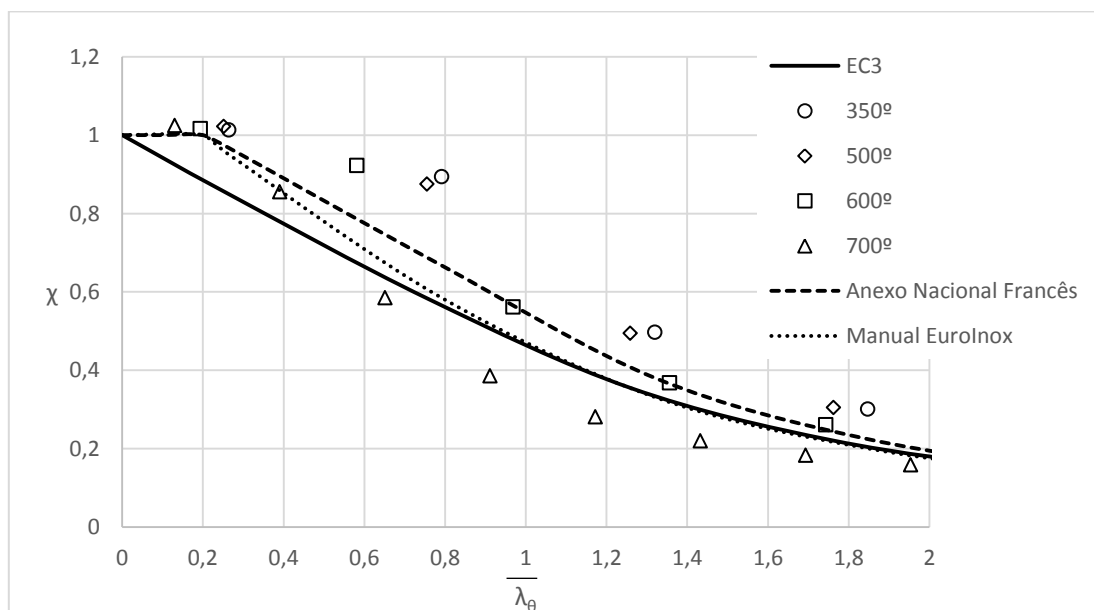


Figura 33 - Resultados numéricos para o pilar 120x5 165x8 de aço inoxidável de classe 1.4003 (alma de classe 3 e banzo de classe 4)

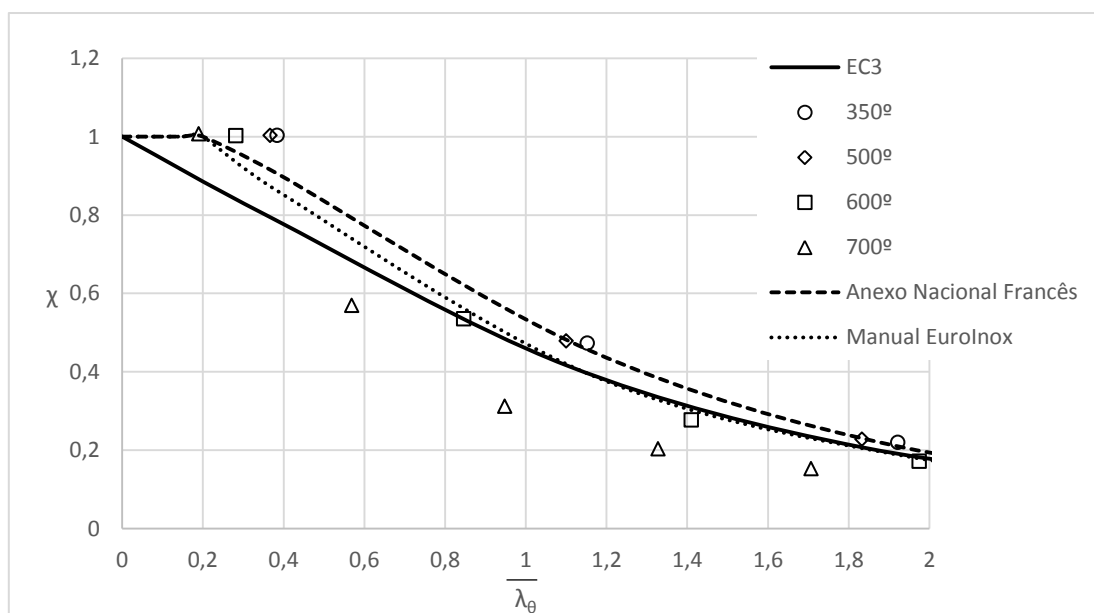


Figura 34 - Resultados numéricos para o pilar 130x5 115x8 de aço inoxidável de classe 1.4003 (alma de classe 4 e banzo de classe 2)

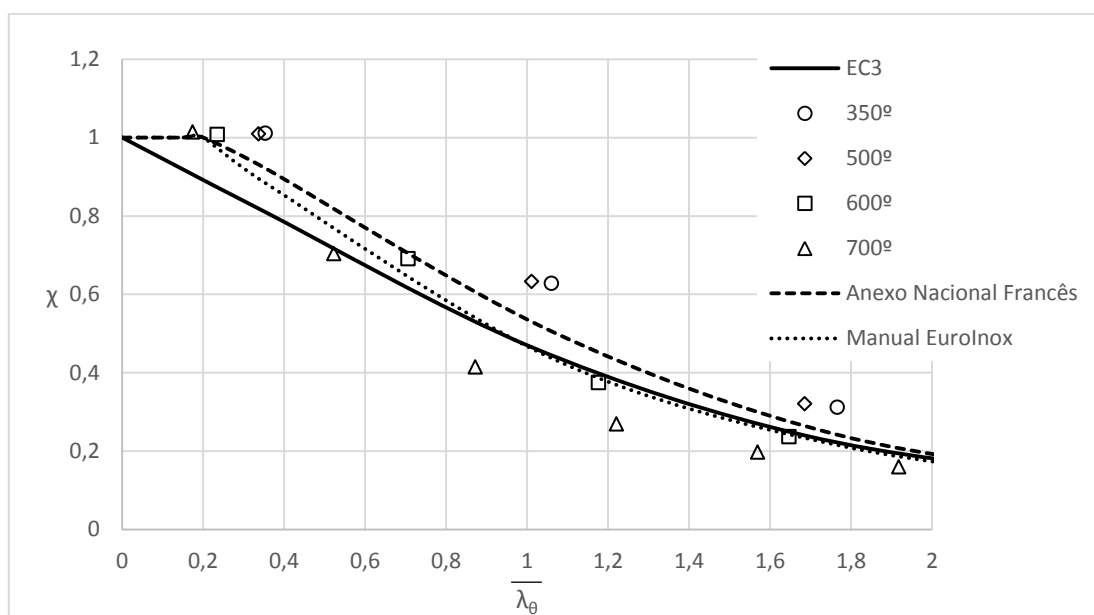


Figura 35 - Resultados numéricos para o pilar 150x5 135x8 de aço inoxidável de classe 1.4003 (alma de classe 4 e banzo de classe 3)

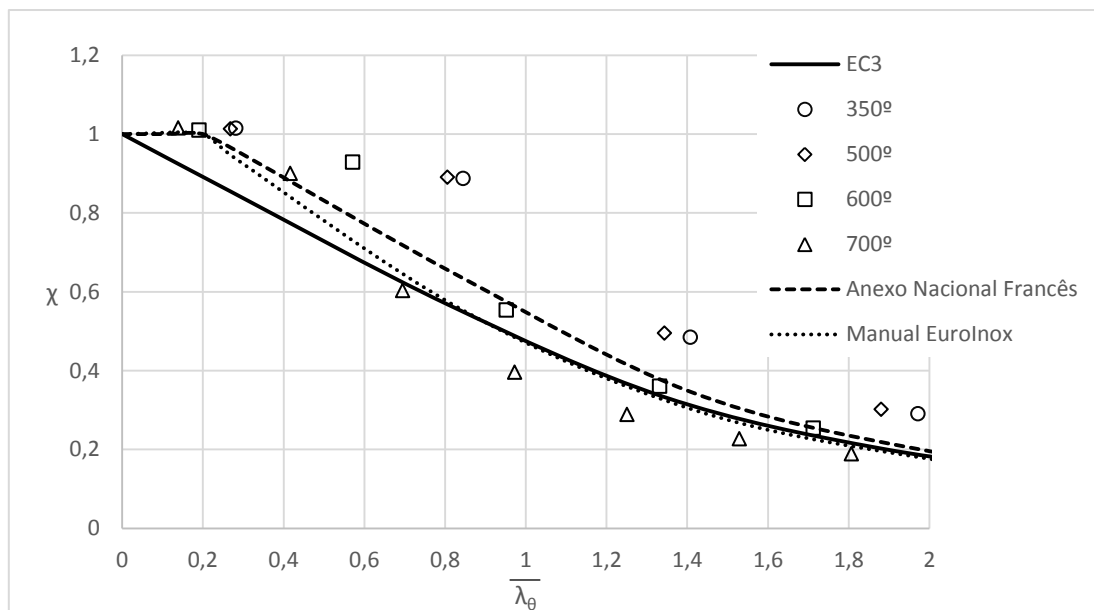


Figura 36 - Resultados numéricos para o pilar 165x5 165x8 de aço inoxidável de classe 1.4003 (alma de classe 4 e banzo de classe 4)

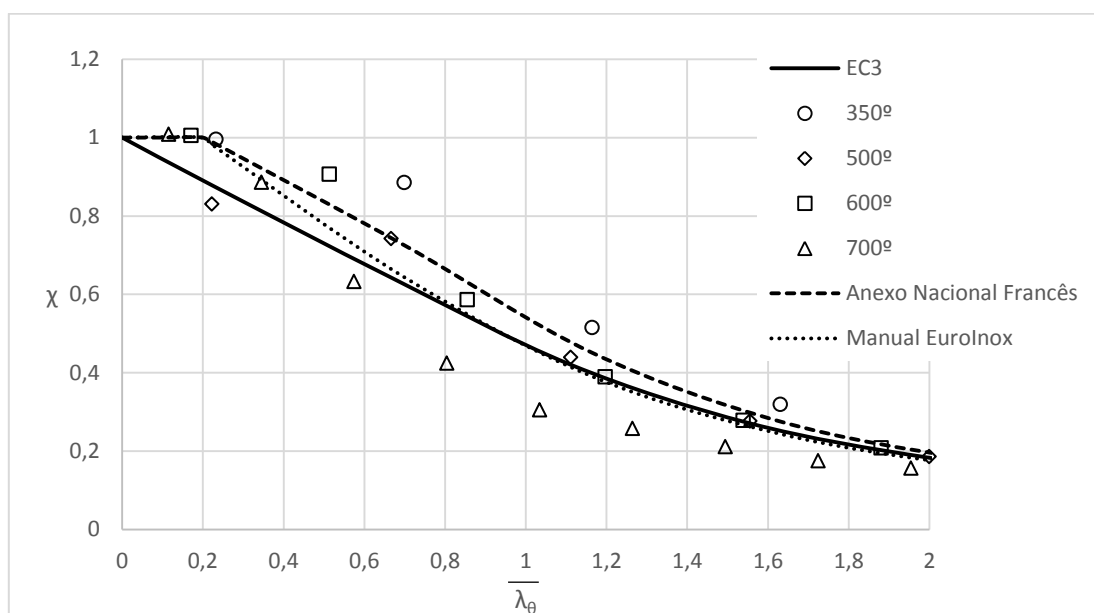


Figura 37 - Resultados numéricos para o pilar 250x6 200x8 de aço inoxidável de classe 1.4003 (alma de classe 4 e banzo de classe 4)

4.1.2.3. Influência da secção transversal no duplex (1.4662)

O Eurocódigo 3 em relação aos resultados numéricos do aço 1.4662 encontra-se do lado da segurança, pois apenas dois pontos não se encontra do lado da segurança, apesar de para esbeltezas menores este se encontrar mais uma vez conservativo. De realçar o facto de quando a alma é de classe 2 ou 3 (figura 38 e 39) estas secções se encontrarem mais do lado da segurança em comparação a quando a classe da alma é 4. Por fim, destacar o

facto de que para a secção mais esbelta (figura 43) a maioria dos pontos se encontrar mais perto da curva em relação às restantes.

Em relação à proposta do Anexo Nacional Francês mais uma vez os resultados do SAFIR se encontram do lado da segurança, havendo uma pequena menoridade de pontos do lado da insegurança. Esta é a proposta que se aproxima mais dos resultados obtidos das três propostas apresentadas.

A proposta do EuroInox encontra-se do lado da segurança, sendo que para esbeltezas mais elevadas a sua curva encontra-se um pouco mais baixa em relação às restantes duas curvas.

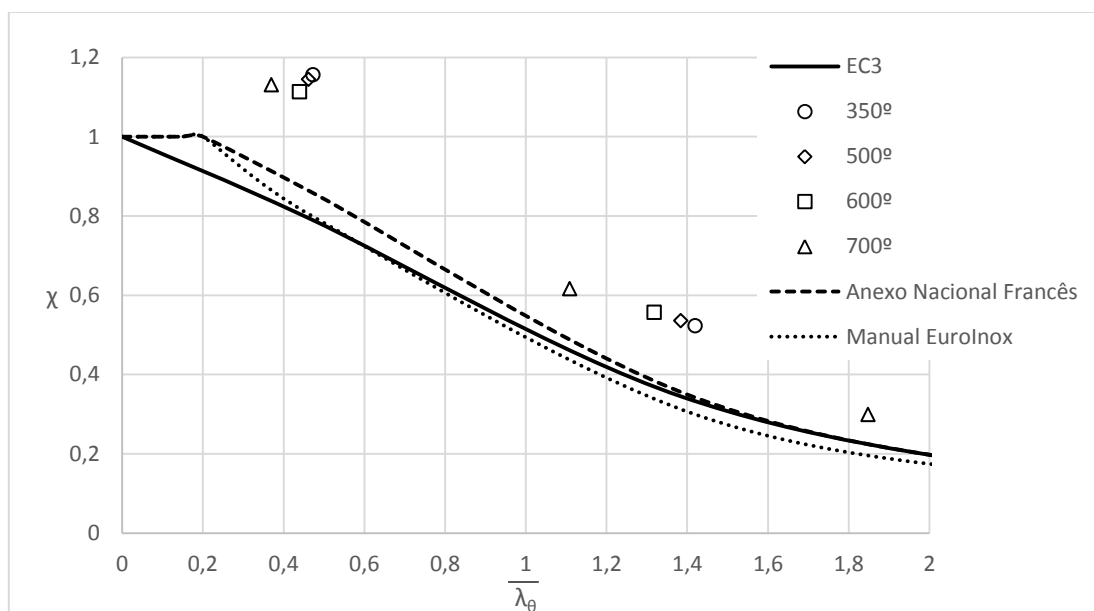


Figura 38 - Resultados numéricos para o pilar 77x5 115x8 de aço inoxidável de classe 1.4462 (alma de classe 2 e banzo de classe 4)

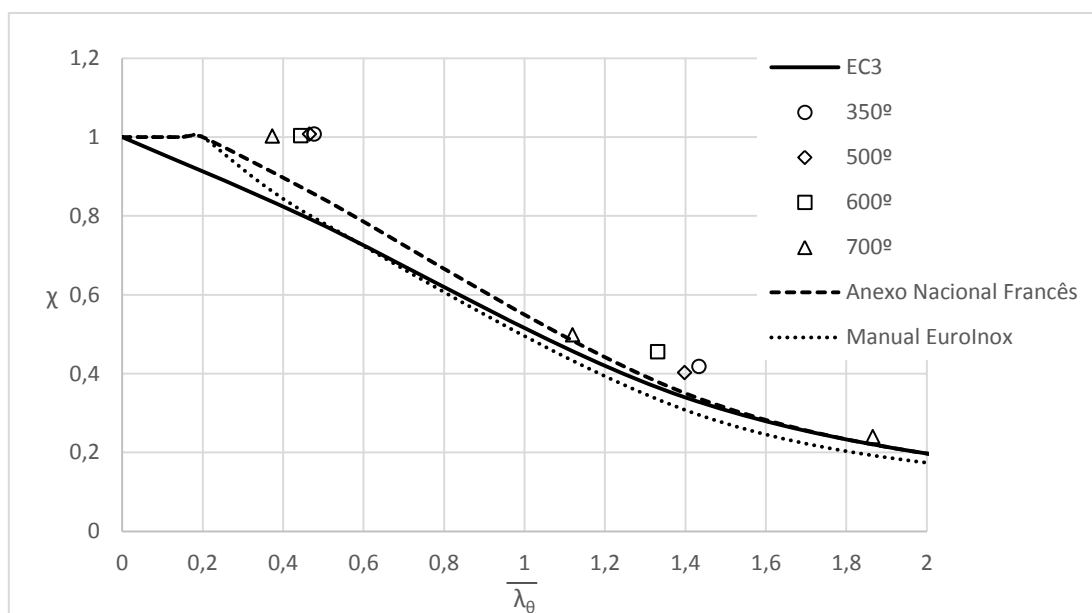


Figura 39 - Resultados numéricos para o pilar 90x5 115x8 de aço inoxidável de classe 1.4462 (alma de classe 3 e banzo de classe 4)

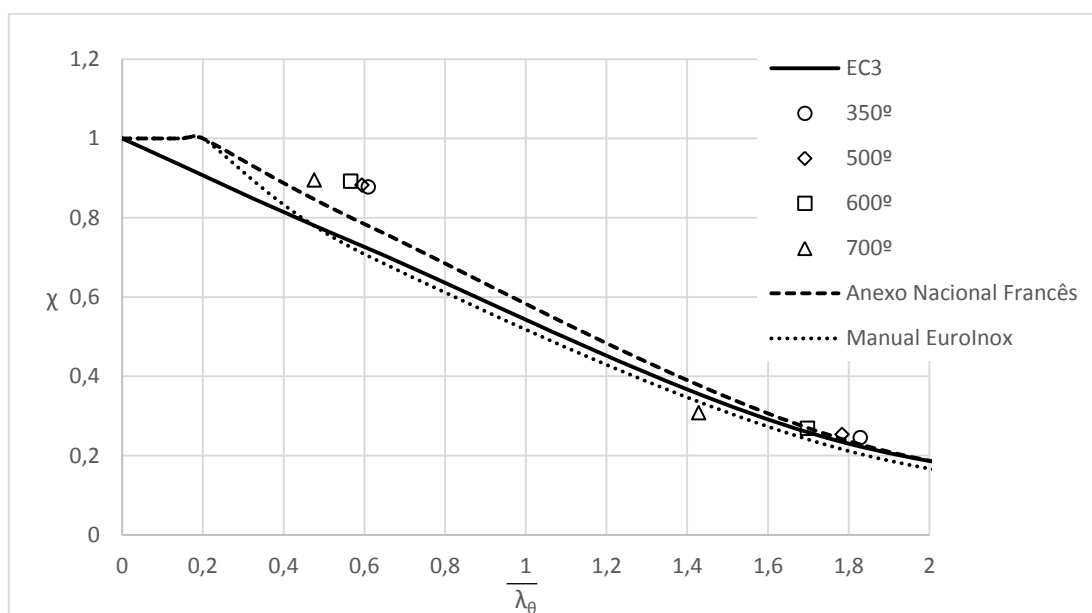


Figura 40 - Resultados numéricos para o pilar 95x5 92x8 de aço inoxidável de classe 1.4462 (alma de classe 4 e banzo de classe 2)

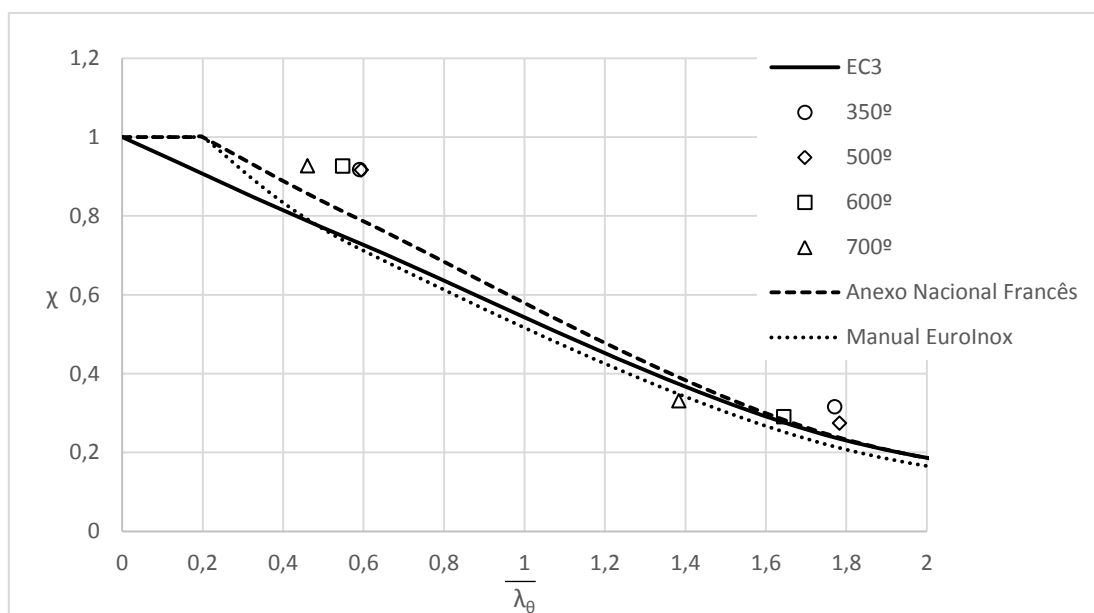


Figura 41 - Resultados numéricos para o pilar 95x5 95x8 de aço inoxidável de classe 1.4462 (alma de classe 4 e banzo de classe 3)

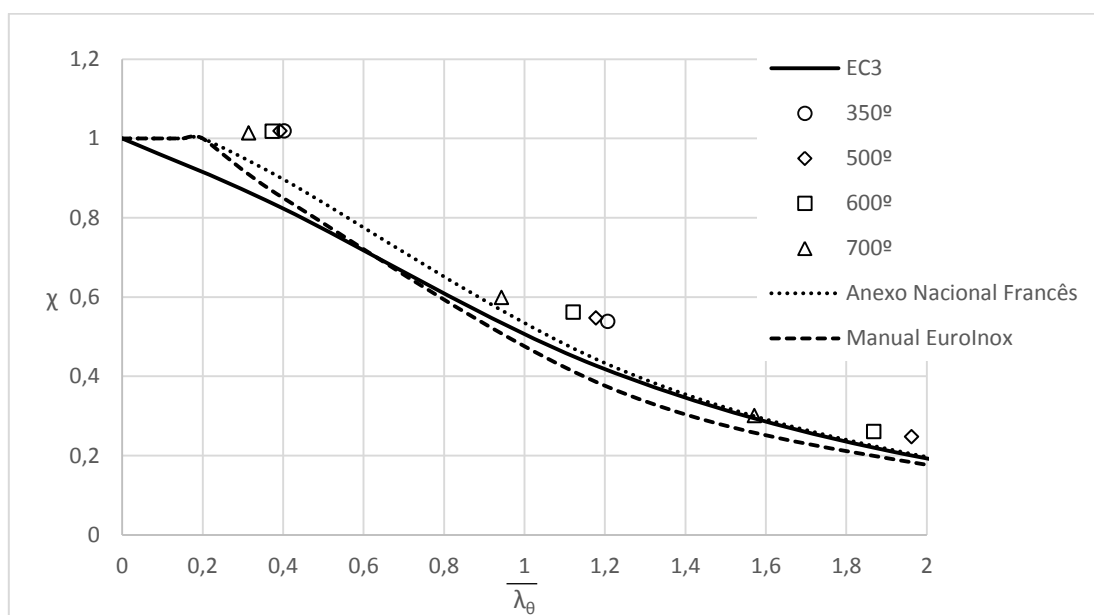


Figura 42 - Resultados numéricos para o pilar 150x5 135x8 de aço inoxidável de classe 1.4462 (alma de classe 4 e banzo de classe 4)

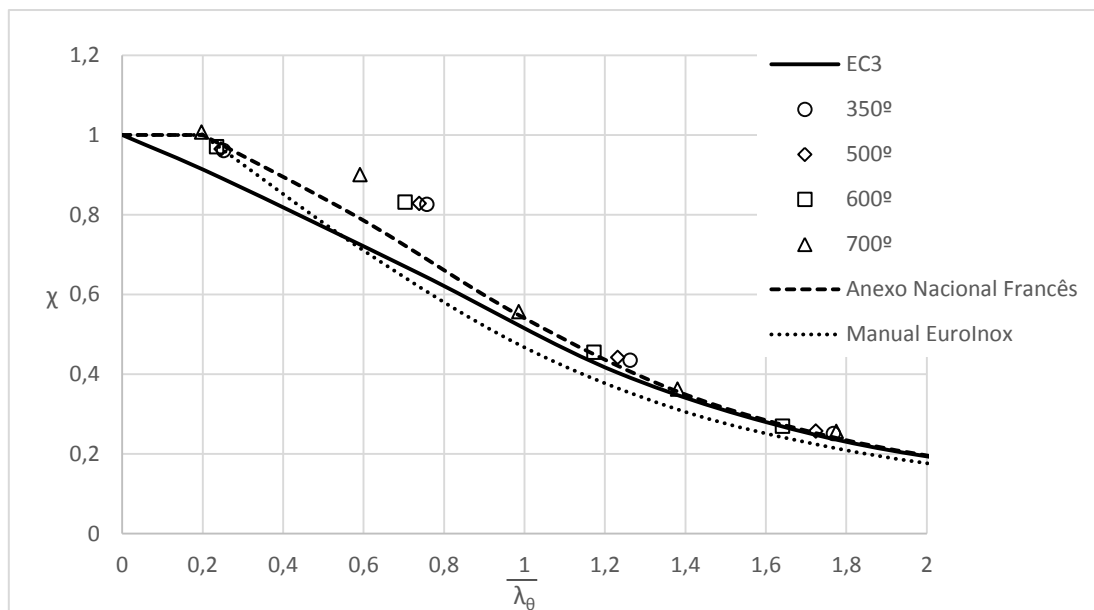


Figura 43 - Resultados numéricos para o pilar 250x6 200x8 de aço inoxidável de classe 1.4462 (alma de classe 4 e banzo de classe 4)

4.2.Avaliação Estatística

Para uma melhor perceção dos resultados do estudo numérico efetuado, foi realizado uma avaliação estatística comparando os resultados numéricos do SAFIR com as propostas enunciadas anteriormente. Na elaboração dos gráficos foi determinado o quociente entre a proposta a ser compara e o resultado numérico correspondente para a mesma secção, temperatura, tipo de aço e comprimento. A linha contínua representada no gráfico corresponde ao limite de segurança entre a proposta a estudar e os resultados numéricos e a linha a tracejado corresponde à linha de tendência dos resultados. O Aço 1.4662 pelo facto de apresentar poucos resultados numéricos dentro do intervalo de esbelteza definido (de 0 a 2), não foi considerado para a avaliação estatística, pois com poucas amostras os resultados poderiam não corresponder à realidade.

Nas seguintes tabelas são apresentados alguns parâmetros que foram determinados para o tratamento estatístico de todas as propostas analisadas, de forma a potenciar a compreensão dos resultados numéricos obtidos. Os parâmetros são os seguintes: número de amostras, média, desvio padrão e amostras fora da segurança relativamente aos resultados SAFIR.

Tabela 5 - Avaliação estatística referente à comparação entre as propostas analisadas e os resultados numéricos

	EUROCÓDIGO 3	A. N. FRANCÊS	M. EUROINOX
NÚMERO DE AMOSTRAS	234	234	234
MÉDIA	0.89	1.03	0.93
DESVIO PADRÃO	0.19	0.20	0.18
AMOSTRAS FORA DA SEGURANÇA	37 (15.8%)	91 (38.9%)	44 (18.8%)

Tabela 6 – Avaliação estatística referente à comparação entre as propostas analisadas e os resultados numéricos (aço 1.4301)

	EUROCÓDIGO 3	A. N. FRANCÊS	M. EUROINOX
NÚMERO DE AMOSTRAS	118	118	118
MÉDIA	0.83	0.98	0.88
DESVIO PADRÃO	0.07	0.07	0.07
AMOSTRAS FORA DA SEGURANÇA	0 (0%)	36 (30.5%)	3 (2.5%)

Tabela 7 - Avaliação estatística referente à comparação entre as propostas analisadas e os resultados numéricos (aço 1.4003)

	EUROCÓDIGO 3	A. N. FRANCÊS	M. EUROINOX
NÚMERO DE AMOSTRAS	116	116	116
MÉDIA	0.95	1.08	0.98
DESVIO PADRÃO	0.24	0.27	0.23
AMOSTRAS FORA DA SEGURANÇA	37 (31.9%)	55 (47.4%)	41 (35.3%)

Seguidamente nas figuras 44 45 e 46, apresentam-se os resultados obtidos entre as três propostas estudadas e os resultados numéricos do SAFIR. Comparando as figuras e observando a tabela 5, rapidamente se percebe que o EC3 é o que se encontra mais do lado da segurança, tendo o menor número de resultados do lado da insegurança, concretamente 27 de 234 (15.8%). No entanto, analisando a sua média de 0.89 percebe-se que este se encontra demasiado conservativo, tendo o Anexo Nacional Francês a média mais próxima de um (1.03) apesar de ser o que mais resultados tem fora da segurança (38.9%). Destaca-se ainda o elevado desvio padrão das três propostas, muito devido ao alto desvio padrão do aço ferrítico (1.4003) que se pode observar na tabela 7.

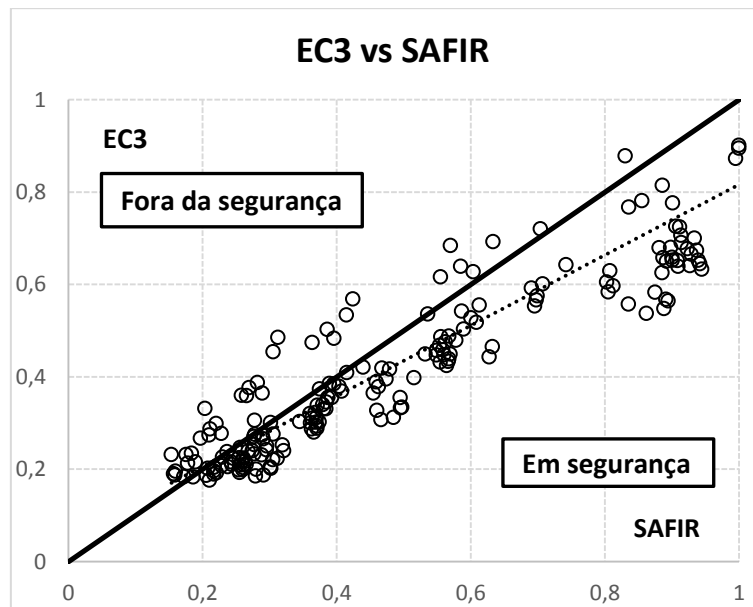


Figura 44 - Comparação estatística entre o EC3 e os resultados numéricos para todas as classes de aço

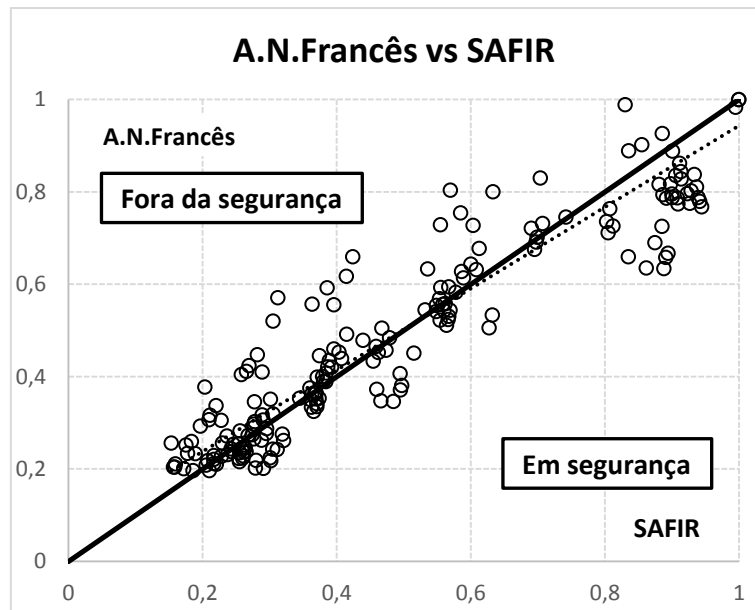


Figura 45 - Comparação estatística entre o A. N. Francês e os resultados numéricos para as todas classes de aço

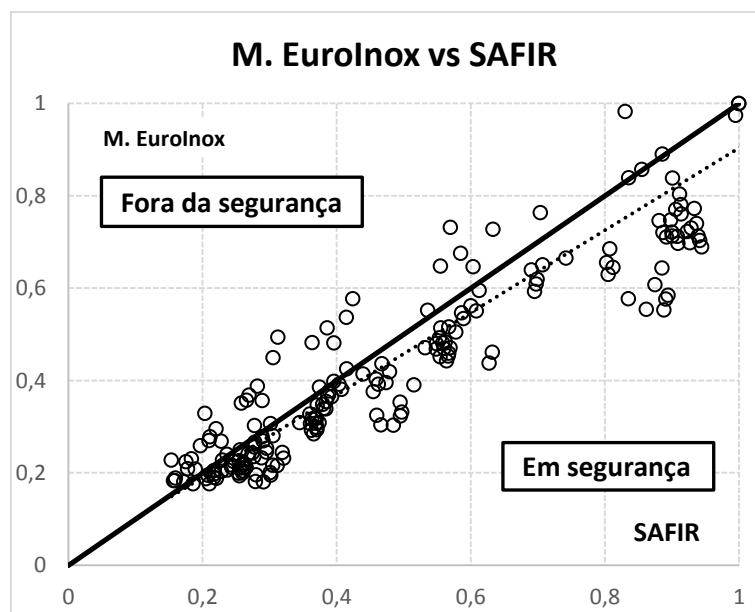


Figura 46 - Comparação estatística entre o M. EuroInox e os resultados numéricos para a todas as classes de aço

Nas figuras seguintes compara-se as várias propostas com os resultados numéricos obtidos do SAFIR mas individualmente para cada classe de aço. Da figura 47 à 49 é representado o aço de classe 1.4301. Analisando as mesmas percebe-se que para a classe 1.4301 os resultados estão na sua grande maioria do lado da segurança, existindo um maior número de pontos fora da segurança em relação ao Anexo Nacional Francês (30.5%). Quanto ao desvio padrão é muito aproximado entre as três propostas (tabela 6). A média do EC3 mais uma vez é reduzida (0.83), o que demonstra que esta proposta é demasiado conservativa para este aço.

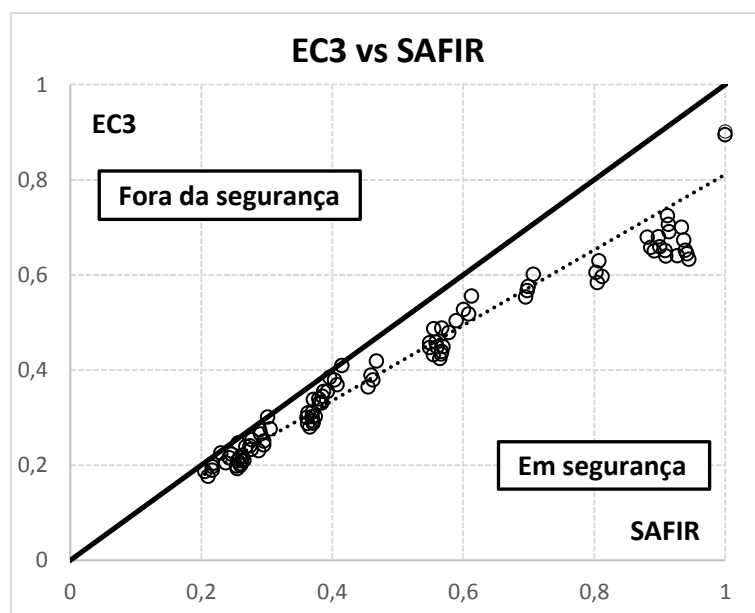


Figura 47 – Comparação estatística entre o EC3 e os resultados numéricos para a classe 1.4301

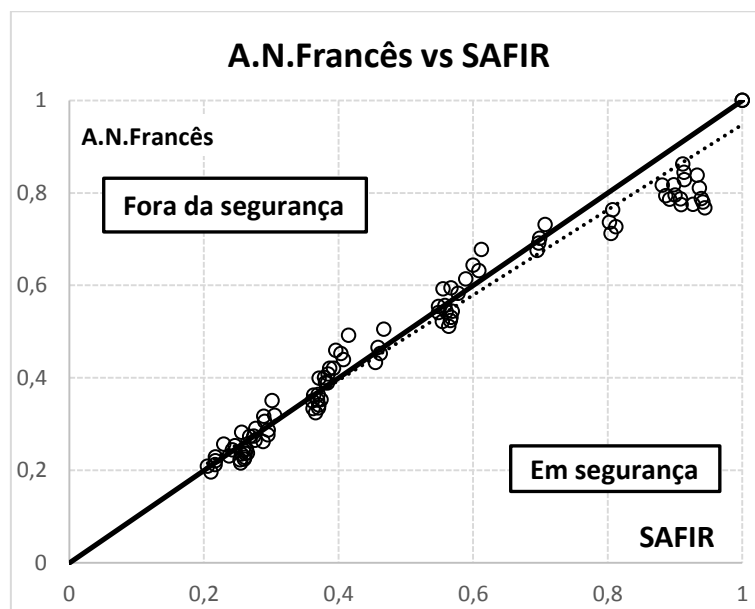


Figura 48 - Comparação estatística entre o A. N. Francês e os resultados numéricos para a classe 1.4301

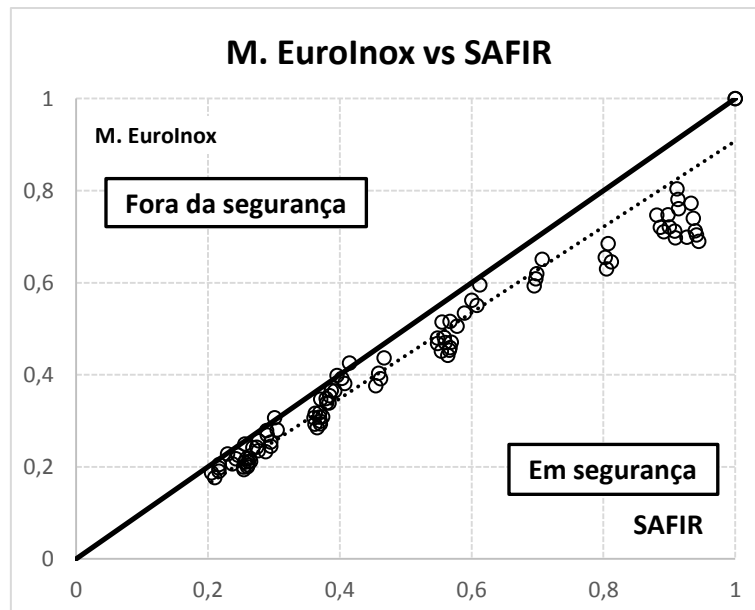


Figura 49 - Comparação estatística entre o M. EuroInox e os resultados numéricos para a classe 1.4301

As figuras 50, 51 e 52 mostram a comparação estatística do aço de classe 1.4003. O maior destaque é o elevado desvio padrão para qualquer uma das propostas (tabela 7), que demonstra o referido anteriormente, esta classe apresenta uma grande dispersão de resultados. Destaca-se ainda o elevado número de pontos fora da segurança em comparação com a classe 1.4301 (tabela 7), sendo que para o Anexo Nacional Francês este valor é de 47.4%, muito próximo de 50%. Quanto à média encontra-se muito perto de um para as três propostas.

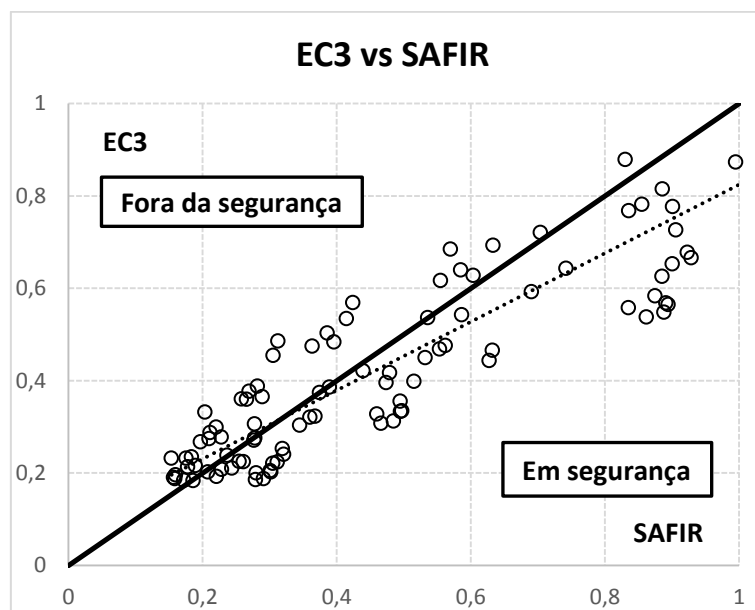


Figura 50 - Comparação estatística entre o EC3 e os resultados numéricos para a classe 1.4003

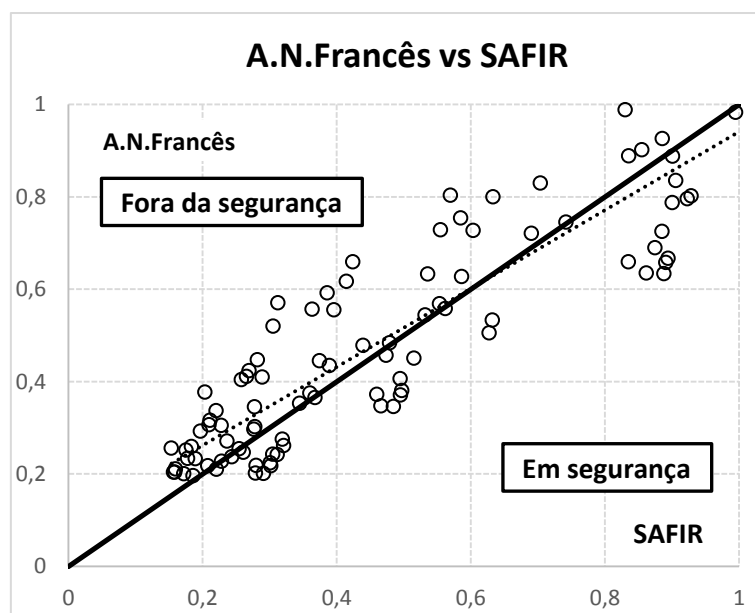


Figura 51 - Comparação estatística entre o A. N. Francês e os resultados numéricos para a classe 1.4003

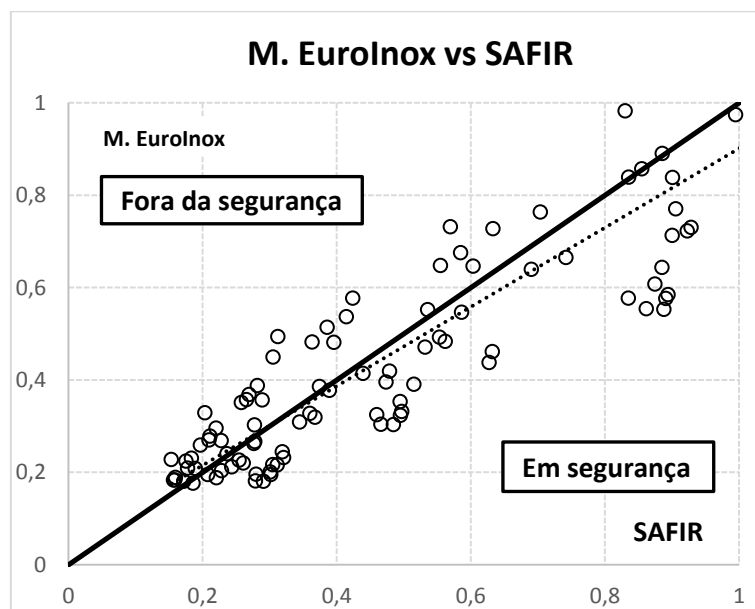


Figura 52 - Comparação estatística entre o M. EuroInox e os resultados numéricos para a classe 1.4003

Capítulo 5

Considerações Finais

5 Considerações Finais

5.1 Considerações gerais

5.2 Desenvolvimentos futuros

5. Considerações Finais

5.1. Conclusões gerais

Neste capítulo pretende-se finalizar com uma análise ao trabalho desenvolvido e realçar os aspetos de maior pertinência, bem como retirar conclusões a partir dos mesmos.

A presente dissertação teve como principal objetivo aprofundar o conhecimento existente do comportamento de pilares de aço inoxidável com secções em I de Classe 4 a altas temperaturas através de uma análise numérica com o auxílio do programa SAFIR.

Na modelação numérica foi apresentado o programa SAFIR, os casos de estudo e definida a secção utilizada no modelo numérico assim como a descrição do próprio modelo.

Em seguida foram apresentados os resultados numéricos obtidos fazendo a comparação com as propostas definidas, onde foi realizada uma análise tendo em consideração a influência do tipo de aço e a secção transversal. Por fim fez-se uma breve avaliação estatística dos resultados numéricos.

Com este estudo foi possível chegar a algumas conclusões, dividindo-se as mesmas na influência dos parâmetros já definidos:

- a) Tipo de aço: o Eurocódigo 3 encontra-se no lado da segurança, embora demasiado conservativo; a curva do Anexo Nacional Francês é a que mais se aproxima dos resultados obtidos de entre as propostas; o ferrítico é o que apresenta resultados mais dispersos, com grandes discrepâncias de valores entre as quatro temperaturas e tendo vários resultados do lado da insegurança; o duplex é o aço que apresenta maiores valores de resistência.
- b) Tipo de secção transversal: o Eurocódigo 3 encontra-se no lado da segurança, embora mais uma vez demasiado conservativo para esbeltezas menores; a curva do Anexo Nacional Francês é a mais aproxima dos resultados obtidos de entre as propostas apesar de não se encontrar do lado da segurança para alguns pontos; para o aço ferrítico à uma grande dispersão com tendência a temperaturas de

350°C e 500°C a encontrarem-se mais do lado da segurança em relação às temperaturas de 600°C e 700°C.

Por fim, com a avaliação estatística de todas as propostas analisadas com os resultados numéricos obtidos, observou-se que a proposta com menor média foi a do EC3 (0.89), assim como com menor número de amostras fora da segurança (15.8%), sendo o Manual EuroInox o que apresentou menor desvio padrão (0,19). O Anexo Nacional Francês exibiu o maior desvio padrão (0.2), o maior número de amostras fora da segurança (38.9%) assim como a média menos segura comparada aos resultados numéricos (1.03).

5.2.Desenvolvimentos futuros

Findado o trabalho desenvolvido nesta dissertação e após uma análise do mesmo, verificaram-se outros pontos pertinentes a analisar futuramente de modo a aprofundar o conhecimento relativo ao comportamento do aço inoxidável quando sujeito a altas temperaturas.

Os aços que se optaram por analisar nesta dissertação foram os de classe 1.4301, 1.4003 e 1.4662 por serem os mais utilizados dentro do seu tipo, no entanto, não deixa de apresentar valor outro trabalho que desenvolva um estudo com diferentes aços, como o 1.4571 ou 1.4401.

Por fim, dado que os resultados numéricos foram um pouco conservativos em relação ao Eurocódigo 3, novas propostas que se adequem melhor aos resultados numéricos podem ser desenvolvidas.

Referencias Bibliográficas

Referencias Bibliográficas

Arrais, Flávio (2012). “Comportamento de elementos enformados a frio em situação de incêndio” Dissertação para obtenção do grau de mestre, Universidade de Aveiro.

CEN, Comité Europeu De Normalização (2005a). “EN 1993–1–1, Eurocode 3, Design of Steel Structures – Part 1–1: General rules and rules for buildings”, Brussels, Belgium.

CEN, Comité Europeu De Normalização (2005b). “*EN 1993–1–2, Eurocode : Design of Steel Structures – Part 1–2: General rules and rules for buildings*”, Bruxelas, Bélgica.

CEN, Comité Europeu De Normalização (2005c). “*EN 10088-2, Stainless steels – Part 2: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes*”. Bruxelas, Bélgica.

CEN, Comité Europeu De Normalização (2006a). “*EN 1993-1-4, Eurocode 3 : Design of steel structures – Part 1-4: General rules – Supplementary Rules for Stainless steels*”. Bruxelas, Bélgica.

CEN, Comité Europeu De Normalização (2006b). “*EN 1993–1–5, Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1–5: Plated structural elements*”. Bruxelas, Bélgica.

Couto, C; Vila Real, P. M. M.; Lopes, N. (2013). “*RUBY an interface software for running a buckling analysis of SAFIR models using Cast3M*”. Universidade Aveiro

ESDEP (2000). “*Programa Europeo de Formación en el Cálculo y Diseño de la Construcción en Acero*”. Espanha: Instituto Técnico de la Estructura en Acero (IETA).

EuroInox (2000). Disponível em < <http://www.euro-inox.org/>>. “*European Stainless Steel Development Association*”.

EuroInox (2006). “*Design Manual for Structural Stainless Steel*”. Steel Construction Institute, 3ªEdição.

Frassen, J. M. (2005). “*SAFIR: A thermal/structural program for modelling structures under fire*”. Engineering Journal- American Institute of Steel Construction Inc. Vol 42, nº3.

Gardner, L. (2004). “*Numerical Modeling of Stainless Steel Structural Components – A consistent Approach*”. Journal of Constructional Engineering, ASCE. P 1586–1601.

Gardner, L. (2005). “*The use of stainless steel in structures*”. Progress in Structural Engineering and Materials. Vol 7, nº 2, p. 45-55.

Gardner, L.; Insausti, A.; Ng, K.; Ashraf, M. (2010). “*Elevated temperature material properties of stainless steel alloys*”. Journal of Constructional Steel Research. Vol 66, nº 5, p.634-647

Knobloch, M.; Fontana, M. (2006). “*Strain-based approach to local buckling of steel sections subjected to fire*”. Journal of Constructional Steel Research. Vol 62, nº 1, p. 44-67.

Lopes, N.; Vila Real, P.M.M.; Simões da Silva, L.; Franssen, J.M. (2010). “*Axially loaded stainless steel columns in case of fire*”. Structural Fire Engineering Journal. Vol 1, nº1.

Lopes, N.; Vila Real, P.M.M.; Simões da Silva, L.; Franssen, J.M. (2012a). “*Numerical analysis of stainless steel beam-columns in case of fire*”. Fire Safety Journal. Vol 50, p.35-50.

Lopes, N (2014b). “*Estruturas de aço inoxidável*” Apresentação power point, 2014.

Lopes, N.; Vila Real, P. M. M. (2011). “*Resistência de elementos estruturais em aço inoxidável à temperatura normal utilizando as leis constitutivas da parte 1.2 e 1.4 do ec3: estudo comparativo*”. Congress on Numerical Methods in Engineering.

Lopes, N (2009). “*Comportamento ao fogo de estruturas em aço inoxidável*” Dissertação para obtenção do grau de doutor, Universidade de Aveiro.

Palacios, L.(2005). “*Shear Design of Stainless Plate Girders*”. Universitat Politècnica de Catalunya. Dissertação de Doutoramento.

Pinto, A. (2010). “*Estabilidade local de perfis de aço enformados a frio*” Dissertação para obtenção do grau de mestre, Instituto Superior Técnico.

Quiel, S.E.; Garlock, M.E.M. (2010). “*Calculating the buckling strength of steel plates exposed to fire*”. Thin-Walled Structures. Vol 48, nº 9, p. 684-695.

Rossi, B. (2010). “*Mechanical behavior of ferritic grade 3Cr12 stainless steel—Part 1: Experimental investigations*”. Thin-Walled Structures. Vol 48, nº 7, p. 553-560.

Simões da Silva, L.; Gervásio, H. (2007). “*Manual de dimensionamento de estruturas metálicas: métodos avançados: eurocódigo 3: projecto de estruturas de aço*”. CMM- Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista.

Vila Real, P. M. M (2003). “*Incêndio em Estruturas Metálicas - Cálculo Estrutural.*”. Amadora: Edições Orion. 356 p. ISBN 972-8620-04-7

Vila Real, P.M.M. (2010). “*Encurvadura de placas – Enfunamento*”. Apontamentos da unidade curricular Complementos de Construção Metálica e Mista - 5º Ano, Engenharia Civil, Universidade de Aveiro